

# Photoniques

LA LUMIÈRE ET SES APPLICATIONS

## ACTUALITÉS

**L'ignition : un pas décisif pour la fusion**

## ENTRETIENS

**François Cochard  
Thierry Dupoux**

## OSEZ L'OPTIQUE

**Coronographe  
des étoiles en labo**

## ACHETER

**Analyseur  
de front d'onde**

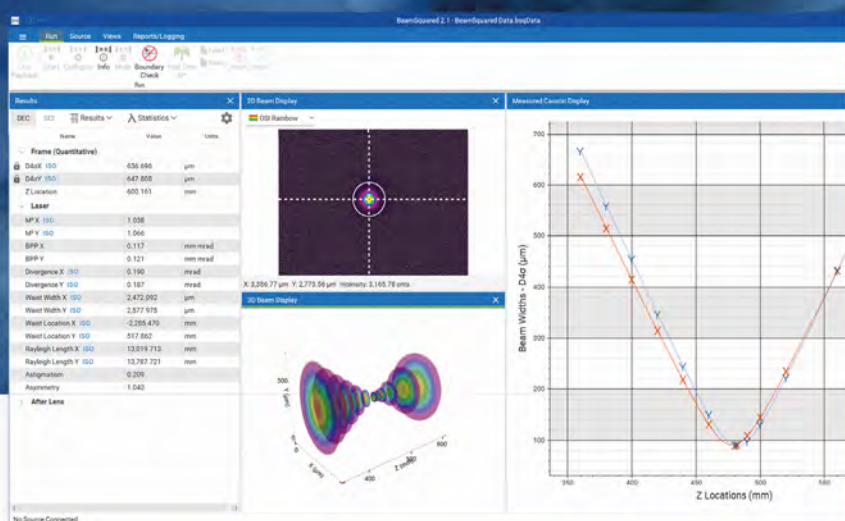
## DOSSIER

# ASTROPHOTONIQUE

- **ALOHA : l'optique non linéaire et fibrée au service de la haute résolution en astronomie**
- **La courbure de capteurs d'image : une amélioration astronomique ?**
- **Astrophotonique : les défis à relever pour les futures puces optiques destinées à l'observation astronomique**
- **AMKIDs : nouveaux détecteurs supraconducteurs ultrasensibles pour l'astronomie**



# L'INSTRUMENT QUE LES FABRICANTS DE LASER UTILISENT



## Ophir BeamSquared

### Analyseur de propagation de faisceau

- Conforme ISO
- Mesure automatiquement la qualité de votre faisceau en quelques secondes
- Développé spécialement pour une utilisation en continu
- Précision inégalée grâce à l'étalonnage breveté
- Continu et pulsé pour la plupart des diamètres et puissances
- Automatisé de 266 à 1800 nm, manuel de 1800 nm jusqu'à l'IR lointain
- **NOUVEAU** : fonctionne pour les lasers avec une longueur de Rayleigh jusqu'à 20 m

Appelez-nous +33 6 01 01 27 32 ou visitez notre site web: [www.ophiropt.com](http://www.ophiropt.com)

Photoniques est éditée par la Société Française de Physique, association loi 1901 reconnue d'utilité publique par décret du 15 janvier 1881 et déclarée en préfecture de Paris.

<https://www.sfpnet.fr/>

Siège social : 33 rue Croulebarbe, 75013 Paris, France  
Tél. : +33(0)1 44 08 67 10  
CPPAP : 0124 W 93286  
ISSN : 1629-4475, e-ISSN : 2269-8418

[www.photoniques.com](http://www.photoniques.com)



Le contenu rédactionnel de Photoniques est élaboré sous la direction scientifique de la Société française d'optique  
2 avenue Augustin Fresnel  
91127 Palaiseau Cedex, France  
Florence HADDOUCHE  
Secrétaire Générale de la SFO  
[florence.haddouche@institutoptique.fr](mailto:florence.haddouche@institutoptique.fr)

#### Directeur de publication

Jean-Paul Duraud, secrétaire général de la Société Française de Physique

#### Rédaction

Rédacteur en chef  
Nicolas Bonod  
[nicolas.bonod@edpsciences.org](mailto:nicolas.bonod@edpsciences.org)

Journal Manager  
Florence Anglézio  
[florence.angelizio@edpsciences.org](mailto:florence.angelizio@edpsciences.org)

Secrétariat de rédaction et mise en page  
Agence de communication la Chamade  
<https://agencelachamade.com/>

#### Comité de rédaction

Pierre Baudoz (Observatoire de Paris), Marie-Begoña Lebrun - (Phasics), Benoît Cluzel - (Université de Bourgogne), Émilie Colin (Lumibird), Sara Ducci (Université de Paris), Céline Fiorini-Debuisschert (CEA), Riad Haidar (Onera), Patrice Le Boudec (IDIL Fibres Optiques), Christian Merry (Laser Components), François Piuze (Société Française de Physique), Marie-Claire Schanne-Klein (École polytechnique), Christophe Simon-Boisson (Thales LAS France), Ivan Testart (Photonics France).

#### Advertising

Annie Keller  
Cell phone: +33 (0)6 74 89 11 47  
Phone/Fax: +33 (0)1 69 28 33 69  
[annie.keller@edpsciences.org](mailto:annie.keller@edpsciences.org)

#### International Advertising

Bernadette Dufour  
Cell phone + 33 7 87 57 07 59  
[bernadette.dufour@edpsciences.org](mailto:bernadette.dufour@edpsciences.org)

Photoniques est réalisé par EDP Sciences, 17 avenue du Hoggar, P.A. de Courtaboeuf, 91944 Les Ulis Cedex A, France  
Tél. : +33 (0)1 69 18 75 75  
RCS : EVRY B 308 392 687

#### Gestion des abonnements

[abonnements@edpsciences.org](mailto:abonnements@edpsciences.org)

#### Impression

Fabrègue imprimeur  
B.P. 10  
87500 Saint-Yrieix la Perche  
Dépôt légal : Janvier 2023  
Route : STAMP (95)



## Éditorial



NICOLAS BONOD

Rédacteur en chef

## L'optique vers de nouveaux horizons

La photonique et l'instrumentation optique ont été au cœur de quelques uns des plus grands projets scientifiques modernes. Nous avons assisté ces derniers mois à des annonces majeures qui bouleversent nos connaissances et ouvrent de nouveaux horizons.

Les premières images du télescope spatial James Webb dévoilées le 12 juillet 2022 ont été largement à la hauteur des attentes puisqu'elles ont permis d'identifier en quelques semaines des galaxies bien plus éloignées que celles cartographiées jusqu'à présent. Depuis, les résultats spectaculaires s'enchaînent et les instruments embarqués font merveille. NIRCam et MIRI ont acquis des images à haut contraste de l'exoplanète HIP 65426 b dont la qualité permet désormais d'envisager l'observation de plus petites exoplanètes. La spectroscopie proche infra-rouge a également permis l'identification de dioxyde de carbone dans l'atmosphère de l'exoplanète WASP-39 b, une première. Cette série de découvertes a profondément marqué l'année 2022 et ouvre une nouvelle ère de l'observation spatiale.

En écho à ces résultats, ce numéro présente un dossier sur l'astrophotonique. Le lien entre l'astronomie et l'optique a depuis toujours été très étroit. Il n'est donc pas surprenant de voir l'astronomie moderne s'emparer des technologies les plus avancées de la photonique pour casser de nombreux verrous.

Des confins de l'univers au confinement inertiel sur Terre... Le projet

de fusion par confinement inertiel laser a franchi une étape décisive le 5 décembre 2022 au National Ignition Facility (NIF) du Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL).

L'annonce d'un gain en énergie de 150% entre l'énergie délivrée par la fusion et celle des faisceaux laser est une étape majeure dans la quête de la fusion nucléaire contrôlée par confinement inertiel laser. Le développement d'une source d'énergie par fusion d'isotopes de l'hydrogène, deutérium et tritium, est un enjeu majeur qui va et qui doit mobiliser nos énergies pour les décennies à venir. Il faut mesurer l'immensité de la tâche : établir les conditions nécessaires à la fusion et les rendre compatibles avec une production stable, fiable et rentable d'énergie. Mais réalisons que 6 décennies seulement séparent la découverte du laser des premiers résultats de fusion par confinement laser, 5 seulement depuis la publication du principe de fusion nucléaire par confinement laser. S'il est difficile de prédire l'avancement dans 5 décennies, nous pouvons espérer que ces tout derniers résultats motiveront le développement de nouvelles installations dédiées à la production d'énergie par confinement laser.

Nous le voyons, les progrès de l'optique n'ont cessé d'ouvrir de nouveaux horizons. Au regard du potentiel des technologies photoniques et du talent des nombreux scientifiques qui les développent, nul doute que l'optique continuera à l'avenir à ouvrir notre regard sur notre monde.

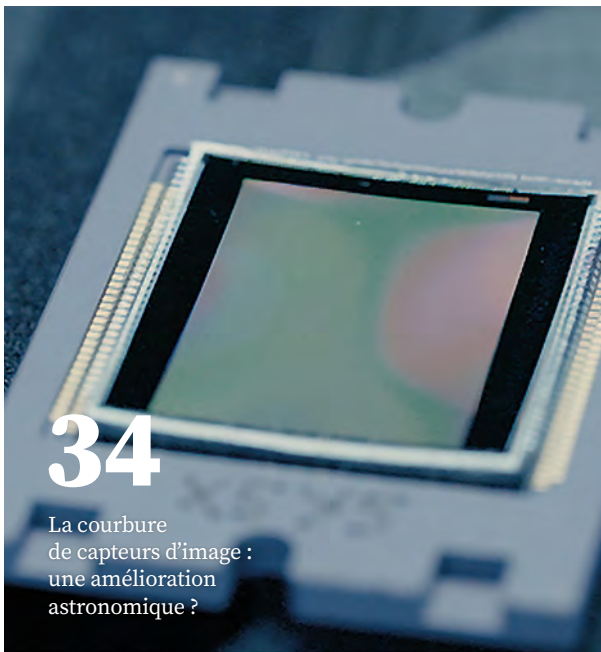


# Sommaire

www.photoniques.com

N° 117

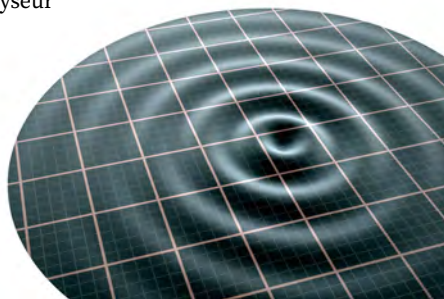
## 16 L'IGNITION : UN PAS DÉCISIF POUR LA FUSION



### 34

La courbure de capteurs d'image : une amélioration astronomique ?

## 49 Acheter un analyseur de front d'onde



### ACTUALITÉS

- 03 Éditorial et actualité de la SFO
- 06 Informations partenaires
- 14 Hommage à Jean-Marc Fournier
- 15 Création du GDR CHALCO
- 16 L'ignition : un pas décisif pour la fusion
- 17 Mots croisés
- 18 Liaison par fibre optique de 1023 km pour coupler 2 horloges atomiques entre Paris et Turin

### ENTRETIENS

- 20 François Cochard, Shelyak
- 22 Thierry Dupoux, Photonics France & Safran

### OSEZ L'OPTIQUE

- 24 Coronographe des étoiles en laboratoire... et découvrir des planètes

### DOSSIER : ASTROPHOTONIQUE

- 30 ALOHA : l'optique non linéaire et fibrée au service de la haute résolution en astronomie
- 36 La courbure de capteurs d'image : une amélioration astronomique ?
- 40 Astrophotonique : les défis à relever pour les futures puces optiques destinées à l'observation astronomique
- 46 AMKIDs : nouveaux détecteurs supraconducteurs ultrasensibles pour l'astronomie

### ACHETER

- 51 Un analyseur de front d'onde

### PRODUITS

- 57 Nouveautés

## Annonces

2B Lighting ..... 25, 39  
 Ardop ..... 29, IV<sup>e</sup> de couv.  
 Comsol ..... 31  
 Edp Sciences ..... 19, 41

EPIC ..... 35  
 FC Equipments ..... 47  
 HTDS ..... 21  
 Idil Fibres Optiques ..... 49  
 Imagine Optic ..... 23

IOGS ..... 27  
 Laser Component ..... 37  
 MKS ..... II<sup>e</sup> de couv.  
 Opton Laser ..... 33, 45  
 Phasics ..... 53

Spectrogon ..... 51  
 Trioptics ..... 43  
 Wavetel ..... 55

Crédit photo (couverture) : © iStockPhoto

# L'édito de la SFO

---



**ARIEL LEVENSON**

Président de la SFO

## **Une discipline au potentiel illimité, une technologie diffusante, la photonique est partout !**

Lors de nos échanges à distance grâce aux liaisons optiques, lorsque nous prenons des photographies avec nos mobiles, dans les phares et capteurs de nos voitures, dans certains soins médicaux, pour le nettoyage des bâtiments, la dépollution... on pratique ou bénéficie de la photonique (des fois sans le savoir). La photonique apporte des solutions pour dépasser les limites dans des domaines extrêmement variés, de l'électronique à l'observation et la manipulation des nanomatériaux et en médecine, biologie, astronomie, ou encore pour le développement de technologies quantiques... Impossible d'être exhaustif dans cet Edito. La photonique est partout !

Aussi nombreux que soient ces exemples, ils n'illustreraient que la partie visible de l'iceberg. Porter ces solutions à maturité en répondant à des défis divers, qui plus est aux interfaces de multiples disciplines, n'est pas l'aboutissement d'un parcours linéaire. Rappelons-nous de la fameuse boutade « le laser, une solution à la recherche d'un problème ». Idem pour l'essor de l'optique non-linéaire, bien malin celui qui aurait anticipé ses succès en microscopie et imagerie pour la biologie, ou pour les technologies quantiques... Encore une fois, la place me manque pour multiplier les exemples. Soyons clairs, il ne s'agit pas d'affirmer qu'une découverte n'a aucune chance de trouver rapidement un marché, mais de souligner que cela n'est souvent pas le cas et que même lorsqu'il l'est, cette avancée bénéficie d'un terreau et d'efforts collectifs que l'on peut tracer directement ou indirectement.

La photonique est partout ! Y compris et surtout dans des centaines de laboratoires français de recherche et développement qui construisent l'avenir, pour qu'un jour les nouveaux concepts en photonique puissent continuer à diffuser et à apporter des réponses aux besoins de la recherche dans des domaines variés et aux besoins de la société et ce, même lorsque ces besoins sont aujourd'hui difficiles à formuler, voire inconnus.

Décideurs scientifiques et politiques, il est temps de fertiliser et d'arroser d'avantage le terreau de la photonique. Non seulement pour son apport en tant que technologie diffusante, qui en a certes bien besoin, mais également en tant que discipline en elle-même, discipline au potentiel illimité et porteuse d'avenir.

2022 a été une belle année pour la SFO ! Nos nouveaux statuts ont été déposés pour la demande de Reconnaissance d'Utilité Publique. Notre Congrès OPTIQUE Nice 2022 a été un franc succès. La série des Wavinaires, créée en partenariat avec les GdR Ondes et Complexe, ravit les nombreux participants. Que dire du Prix Nobel attribué à notre cher Alain Aspect ! La mobilisation et l'enthousiasme de nos jeunes ont été remarquables et présagent d'une belle année 2023.

Photoniques 117 fait la transition entre 2022 et 2023. Je souhaite saisir l'occasion pour réitérer mes chaleureuses félicitations à notre Comité de rédaction, orchestré de main de maître, subtile, par Nicolas Bonod, son Editeur en chef. Les six numéros de cette année nous ont proposé un voyage à travers la diversité photonique, en nous laissant apercevoir sa vitalité et celle des communautés académique et industrielle françaises et européennes. Ils ont illustré ô combien éloquemment, que la photonique est partout !

Et puisque nous y sommes,... 2023 est l'année du 40<sup>ème</sup> anniversaire de la SFO, que nous célébrons dans chacun des six prochains numéros de Photoniques avec des articles qui allieront notre riche histoire et notre avenir excitant, pour continuer à explorer avec vous le potentiel illimité de la photonique.

Excellente année à tous et que la fête commence !

Photoniquement vôtre  
Ariel Levenson  
Directeur de recherche CNRS  
Président de la SFO

## AGENDA

■ **2023 est l'année du 40<sup>e</sup> anniversaire de la Société Française d'Optique. La SFO porte l'engagement de la communauté de l'Optique-Photonique depuis 1983.**

■ **JNOG Lyon 2023**  
SFO Colloque - JNOG Club  
5 au 7 juillet 2023

■ **Optomecanique & nanophononique**  
SFO International Thematic School Houches Physics School, Chamonix Mont Blanc Valley, France  
April 17- 28 2023

■ **Lidar summer school**  
SFO International Thematic School Summer school at the observatoire of Haute Provence, OHP, France  
June 11- 16 2023

■ **Waves in complex media**  
SFO International Thematic School Houches Physics School, Chamonix Mont Blanc Valley, France  
September 17- 29 2023

■ **EOSAM 2023 in Dijon**  
SFO and EOS shared organization Dijon, France  
September 2023 11- 15 2023  
Save the date and Follow us on <https://www.sfoptique.org/>

### LES ÉVÈNEMENTS PARRAINÉS PAR LA SFO

■ **Frisno 16 EIN Gedi, Israel**  
The 16<sup>th</sup> European/  
French Israeli Symposium  
on Nonlinear  
and Quantum Optics  
January 15 - 19 2023

■ **Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation**  
Du 25/01/2023 au 27/01/2023  
Grenoble  
Le 9<sup>e</sup> colloque Interdisciplinaire en Instrumentation (C2I)

■ **Congrès de la Société Française de Physique**  
Du 3/07/2023 au 7/07/2023  
Paris

Retrouvez tous les événements de la SFO sur <https://www.sfoptique.org/>

## 40<sup>e</sup> Journées Nationales d'Optique Guidée

### INL, l'Institut des Nanotechnologies de Lyon



Du mercredi 5 au vendredi 7 juillet 2023, Lyon ville des lumières accueille la communauté francophone de l'optique guidée dans une ambiance conviviale autour des télécommunications optiques, de l'optique intégrée, des lasers fibrés ou intégrés, des capteurs et de l'instrumentation optique.

JNOG LYON 2023, c'est l'occasion de fédérer les différentes branches de l'Optique guidée avec la programmation de deux conférences plénières, 5 conférences thématiques et des sessions posters. Un espace d'expositions industrielles constitue également un terrain propice aux échanges entre industriels et opticiens. La présence de start-ups est fortement encouragée. Plus de 150 chercheurs et industriels sont attendus.

Cette quarantième édition des Journées Nationales d'Optique Guidée de la Société Française d'Optique a pour spécificité d'accueillir pour la première fois, la cérémonie de remise des Prix Jean Jerphagnon, dont le Jury est présidé par le prix Nobel de Physique 2022, Alain Aspect qui nous fera l'honneur de participer à une table ronde. Après un après-midi exceptionnel, le diner de GALA, constituera un moment convivial pour prolonger le plaisir de cet échange. Le Comité Local d'Organisation et le comité scientifique sous la présidence de Christian GRILLET avec la participation du club Jeunes nouvellement créé de la Société Française d'Optique mettront tout en œuvre pour faire de ce grand colloque biennal, la plus belle vitrine des valeurs communes que nous portons : la jeunesse et le dynamisme, la parité et l'ouverture ainsi que l'excellence scientifique.

### Réservez dès maintenant et profitez des Tarifs EarlyBird

La plateforme de soumission est ouverte jusqu'au 15 mars 2023.

Suivez-nous sur <https://www.sfoptique.org>



## CLUB DES JEUNES DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE D'OPTIQUE

Nous sommes heureux et fiers de nos jeunes opticiens qui s'organisent au sein de la Société Française d'Optique pour mener les missions qui leur tiennent à cœur :

Promouvoir les activités scientifiques et techniques de la communauté, à travers les canaux d'information de la SFO.

- Organiser des journées scientifiques nationales ou des sessions de colloques regroupant les jeunes de la SFO.
- Faciliter l'insertion professionnelle des jeunes diplômés du club.
- Faciliter le contact entre les acteurs industriels, les jeunes chercheurs et les étudiants en photonique/optique.

- Faire le lien entre les différents « student chapters » et associations du domaine de la photonique et de l'optique sur le plan national et international.
- Représenter les jeunes de la SFO aux journées de vulgarisation scientifique.
- Faciliter le lien entre les jeunes chercheurs et la SFO.
- Promouvoir les activités de recherches des jeunes chercheurs de la SFO.
- Créer des interactions entre les jeunes chercheurs du club SFO.

Les fondateurs et représentants du club des Jeunes de la SFO :  
Sidi Ely AHMEDOU (XLIM, Limoges),  
Pierre BALAGE (CELIA, Bordeaux),  
Souhaila BOUBLOUH (UFC, Besançon),  
Melissa HEDIR (C2N, Palaiseau),  
et Paul JIMENEZ (INL, Lyon).

## Photonics PhD Days les 19 et 20 janvier 2023



Co-organisés par Photonics Bretagne, Anticipa, ENSSAT et Institut Foton, ces 2 jours ont pour objectif de rassembler les doctorants, centres de recherche et entreprises de la filière photonique, au niveau national, voire international. En effet, parallèlement à cet événement, dans le cadre du projet Photonics4Industry, sont également invités des entreprises et doctorants européens à partir du 18 janvier. Au programme (tout en anglais) : conférences, pitches de thèses, atelier « Start-Up » (réservé aux doctorants de 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> année), entretiens individuels avec des entrepreneurs, réseautage, et visites de Photonics Bretagne, Institut Foton et autres entreprises locales. L'occasion parfaite de découvrir les dernières recherches scientifiques en photonique, d'échanger avec de jeunes doctorants ou ingénieurs et rencontrer des partenaires ou fournisseurs potentiels ! Programme complet et inscription sur :

<https://www.photonics-bretagne.com/19-20-janvier-2023-lannion-photonics-phd-days/>

## POINT D'AVANCEMENT À LANNION SUR LE PROJET 3F2E

Financé par le guichet « Plan de Relance Nucléaire » et mené par 5 partenaires - iXblue, SEDI-ATI, TechnicAtome, EDF, et Photonics Bretagne - le projet 3F2E (Filière française de fibre pour environnement extrême) a pour ambition de développer en 100% Made in France, des revêtements



métalliques et/ou carbone sur fibres optiques spéciales, capables de permettre l'utilisation de capteurs en environnement nucléaire extrême. Photonics Bretagne et iXblue ont accueilli l'ensemble du consortium en novembre afin de faire visiter leurs équipements et faire un point d'avancement sur le projet, dont les 1<sup>ers</sup> résultats de conception de fibre avec revêtement aluminium sont positifs.

## En bref

**Syrlinks**, PME bretonne spécialisée dans les radiocommunications et les radionavigations, est devenue une filiale de SAFRAN Electronics & Defense. Avec cette acquisition, Safran conforte ainsi son leadership dans les équipements de communications Terre-Espace.

**Suite à l'acquisition d'iXblue** par le Groupe Gorgé fin septembre, ECA Group et iXblue deviennent Exail. Grâce à cette alliance, Exail devient un champion industriel mondial de haute technologie spécialisé dans les technologies de pointe en robotique, maritime, navigation, aérospatiale et photonique.

## 1<sup>ère</sup> promotion IAPE à l'ENSSAT

Avec 22 apprentis recrutés, l'Enssat se félicite du démarrage de ce diplôme inédit d'ingénieurs par apprentissage en Photonique et Électronique. Amorcé grâce au concours financier du Plan d'Investissement d'Avenir, qui a permis d'équiper l'école en matériel de pointe, ce diplôme répond aux attentes de la filière. L'accent est mis sur les compétences multidisciplinaires pour une approche globale sur la conception de systèmes photoniques, l'électronique, ainsi que le traitement et l'analyse des données. Les entreprises intéressées par l'accueil en 2023 et 2024 d'un.e apprenti.e ingénieur.e peuvent soumettre leurs projets de terrains d'apprentissages à [ugo.boscolo@enssat.fr](mailto:ugo.boscolo@enssat.fr).

### AGENDA

■ Photonics PhD Days  
19-20 janvier 2023, Lannion

■ Photonics West  
31 janvier - 2 février 2023  
San Francisco (Etats-Unis)

■ Assemblée Générale  
de Photonics Bretagne  
16 juin 2023, Lannion

■ Laser World of Photonics  
27-30 juin 2023, Munich (Allemagne)

## AGENDA DE LA FORMATION CONTINUE

■ **SC2 - Méthode de fabrication et contrôle de systèmes optiques**  
08 au 10 Mars 2023

■ **EF2 - Bases de l'optique**  
14 au 17 Mars 2023  
et 28 au 31 Mars 2023

■ **EF3 - Photométrie et radiométrie (photométrie des instruments, mesures d'éclairage, colorimétrie)**  
04 au 07 Avril 2023

■ **SC9 - Systèmes optiques d'imagerie (viseurs, objectifs, zooms, télescopes, lunettes)**  
11 au 14 Avril 2023

■ **SC19 - Vision industrielle**  
18 au 20 Avril 2023

■ **CO1 - Conception optique de systèmes d'imagerie avec Zemax®/OpticStudio - Initiation**  
15 au 18 Mai 2023

■ **EF5 - Colorimétrie**  
22 au 23 Mai 2023

■ **SC3 - Comprendre les sources laser**  
05 au 09 Juin 2023

■ **CO2IR - Conception optique de systèmes d'imagerie infrarouge avec Zemax®/OpticStudio - Avancé**  
06 au 08 Juin 2023

■ **SC1 - Optomécanique**  
12 au 15 Juin 2023

■ **CO2VIS - Conception optique de systèmes d'imagerie visible avec Zemax®/OpticStudio - Avancé**  
19 au 21 Juin 2023

Tél. : 01 64 53 32 15  
www.fc.institutoptique.fr

### CONTACTS

Emilie Ericher  
01 64 53 32 36  
Annie Keller  
01 64 53 32 15

fc@institutoptique.fr  
www.fc.institutoptique.fr



## Formation continue de l'Institut d'Optique : des stages pour répondre à tous vos besoins en optique et photonique

La formation continue est une mission majeure de l'Institut d'Optique, qui propose une offre complète s'adressant à tous les professionnels de l'optique et de la photonique.

### Stages au catalogue et stages sur-mesure

La formation continue de l'IOGS, c'est avant tout un catalogue de 40 formations :

- des stages sur les fondamentaux de l'optique, qui s'adressent aux personnes qui souhaitent découvrir cet univers passionnant ;
- des stages plus spécialisés pour les experts qui veulent approfondir leurs connaissances (en métrologie, photométrie, conception optique, sécurité laser, optoélectronique, systèmes optroniques ou encore traitement d'image...).

Ces formations au catalogue sont dispensées à l'IOGS et en français, mais il est également possible de les demander en anglais et/ou en distanciel.

Au-delà de ces stages au catalogue, nous répondons aussi à des demandes spécifiques en créant des formations sur-mesure. Les méthodes pédagogiques et les exemples traités sont adaptés aux spécificités de l'entreprise demandeuse, et les coûts de formation sont réduits lorsque plusieurs stagiaires sont inscrits. Ces formations sur-mesure peuvent avoir lieu dans les locaux de l'entreprise demandeuse ou à l'IOGS.

### Une équipe de formateurs experts et pédagogues

Nos formations se démarquent par leur qualité scientifique et par la pédagogie de nos intervenants. Nous nous appuyons en effet sur une équipe de plus de 60 formateurs qui sont tous des experts reconnus dans leur domaine. Certains sont issus du monde académique, d'autres du monde industriel, garantissant ainsi la diversité des points de vue et des expériences.

### Un enseignement par la pratique

Convaincus de l'intérêt d'une mise en pratique immédiate des notions vues en cours,

nous proposons pour la quasi-totalité de nos formations des séances de travail expérimental sur les moyens du LEnsE, le Laboratoire d'Enseignement Expérimental de l'IOGS : plus de 70 montages expérimentaux à la pointe de la technologie sont accessibles.

### Satisfaction des clients

La satisfaction de nos clients est bien sûr notre priorité. En 2021, 98 % de nos stagiaires se disent satisfaits ou très satisfaits du stage suivi ; 96 % d'entre eux sont prêts à le recommander à leurs collègues.

### Une équipe à votre écoute

L'équipe de formation continue est constituée de 4 personnes :

- **Isabelle Ribet**, nommée responsable du service de formation continue le 1<sup>er</sup> septembre 2022.
- **Emilie Ericher**, en charge des aspects administratifs
- **Yohanna Macé**, apprentie
- **Annie Keller**, attachée commerciale.

### Certification Qualiopi



Le service de formation continue de l'IOGS a obtenu en octobre 2022 la certification

Qualiopi au titre de ses actions de formation. Cette certification s'appuie sur les 7 critères du Référentiel National Qualité pour attester de la qualité du processus mis en œuvre. Elle est désormais obligatoire pour tous les prestataires d'actions concourant au développement des compétences qui souhaitent accéder aux fonds publics et mutualisés (OPCO, ...).



## Naissance d'Optitex, un incubateur de projets photoniques et textiles pour accélérer l'émergence de concepts défense

Optitex est un incubateur né de la coopération de Techtera et Minalogic, deux pôles de compétitivité qui fédèrent respectivement les filières du textile technique, du numérique et de l'optique-photonique. Orienté pour sa première édition vers les besoins des secteurs de la défense, ce programme d'open innovation soutenu par la DGA et la Région Auvergne-Rhône-Alpes vise à accompagner les participants de l'émergence d'idées à la réalisation de prototypes, et à financer les meilleurs concepts.

### Au programme :

- 3 ateliers de créativité, de décembre 2022 à juin 2023
- Une phase de prototypage
- Soutien de 4 preuves de concept

Plus d'informations :

<https://www.minalogic.com/lancement-du-premier-incubateur-defense-optitex/>



### MINALOGIC C'EST :

500 ADHÉRENTS, DONT 440 ENTREPRISES (DONT 95 EN PHOTONIQUE)  
817 PROJETS LABELLISÉS ET FINANCÉS À HAUTEUR DE 1,1 MILLIARD D'EUROS  
DE SUBVENTIONS PUBLIQUES, POUR UN INVESTISSEMENT DE R&D DE PLUS  
DE 2,6 MILLIARDS D'EUROS DEPUIS 2005  
+ DE 10000 RENDEZ-VOUS B2B DEPUIS 2005

## RETOUR SUR INPHO VENTURE SUMMIT



L'équipe financement de Minalogic a participé à l'INPHO Venture Summit, un événement dédié aux investisseurs, organisé par le pôle ALPHA-RLH les 13 et 14 octobre derniers à Bordeaux. À cette occasion, des tables rondes de grande qualité ont été proposées, autour des enjeux actuels de réindustrialisation, de souveraineté, de décarbonation d'une part, et du rôle que peuvent jouer des technologies telles que la photonique, l'IA, la blockchain et le quantique d'autre part.

L'équipe de Minalogic a pu nouer des contacts avec de nombreux investisseurs européens et américains investissant à tout stade (du pré-early stage à la série C), dans des projets deeptech, industriels ou non, et sur l'ensemble des technologies couvertes par Minalogic. Ces nouvelles connexions permettront d'accompagner encore mieux nos startups adhérentes dans leurs démarches de levée de fonds.

Pour en savoir plus, contacter Carol Hainaut, en charge du financement des entreprises au sein de Minalogic : [carol.hainaut@minalogic.com](mailto:carol.hainaut@minalogic.com).

**Bon à savoir !** Le programme PhotonHub Europe, dont Minalogic est partenaire, propose un accompagnement aux entreprises qui utilisent des technologies photoniques et qui sont dans une démarche de levée de fonds. L'objectif est de les aider à préparer leurs discussions avec les investisseurs, lors d'événements tels que les MIT4LS 2023 et InPho Summit 2024.

## Les Minalogic Business Meetings sont de retour le 30 mars 2023



La 9<sup>ème</sup> édition des Minalogic Business Meetings se tiendra au Groupama Stadium de Décines-Charpieu, près de Lyon.

Cet événement dédié aux technologies du numérique permet aux offreurs de technologies et aux donneurs d'ordres venant du monde entier de réaliser jusqu'à 16 rendez-vous d'affaires qualifiés en une journée. Cette année, des conférences de haut niveau seront proposées sur le thème des ressources humaines, avec des intervenants nationaux et internationaux.

Inscrivez-vous avant le 9 janvier pour profiter du tarif Super Early Bird !

Pour en savoir plus :

<https://www.minalogicbusinessmeetings.com>

### AGENDA

#### ■ Photonics West 2023

du 28 janvier au 2 février 2023  
à San Francisco

#### ■ 9<sup>ème</sup> édition des Minalogic Business Meetings

le 30 mars 2023 à Lyon

#### ■ Laser World of Photonics

du 27 au 30 juin 2023 à Munich  
Offre d'exposition disponible sur le site internet Minalogic



CONTACTEZ MOI  
Florent Bouvier  
Responsable  
Optique Photonique

chez Minalogic

Tél : +33 (0)6 35 03 98 52

[Florent.bouvier@minalogic.com](mailto:Florent.bouvier@minalogic.com)

## BoS Photonics21 : élection d'Ivan Testart

**Ivan Testart, directeur général de Photonics France, a été élu au Board of Stakeholders de Photonics21.** Composé de 100 membres, le BoS est le principal organe de décision de la plate-forme européenne Photonics21. Bravo également à tous les adhérents français de Photonics France élus à ses côtés :

- Patrick Abraham, **Lynred**
- Nicolas Compère, **Manutech USD**
- Eneka Idiart-Barsoum, PhD, **Huawei Technologies France**
- Pu Jian, **Cailabs**
- David Méchin, **Photonics Bretagne**

## Business Meeting Télécom

**À vos agendas !** Notre prochain Business Meeting sera dédié à la photonique au service du marché des télécoms. Il aura lieu le 21 mars 2023 à Télécom Paris. Des conférences et ateliers sont prévus sur les besoins des principaux donneurs d'ordre et la mise en relations avec les fournisseurs du domaine.

Programme et inscription sur notre site web : [photonics-france.org](http://photonics-france.org)

## Nouvel adhérent



**Bienvenue à GREM notre nouvel adhérent !** Depuis plus de 80 ans à Paris, GREM garantit la réalisation de toutes pièces mécaniques, du prototype à la petite et moyenne série. GREM travaille avec de nombreux spécialistes de la recherche, qu'il s'agisse d'acteurs publics ou privés.

## AGENDA

■ **SPIE Photonics West**  
28 janvier - 2 février 2023

■ **Business Meeting Télécom**  
21 mars 2023

■ **Business Meeting Matériaux**  
10 mai 2023 (date à confirmer)

CONTACT PHOTONICS FRANCE  
[contact@photonics-france.org](mailto:contact@photonics-france.org)  
[www.photonics-france.org](http://www.photonics-france.org)

# French Photonics Days à Saint-Etienne : une belle réussite !



La quatrième édition des French Photonics Days s'est déroulée à Saint-Etienne les 20 et 21 octobre 2022. Ces journées avaient pour thème principal : « Photonique pour l'Affichage, l'Éclairage et le Manufacturing ».

Les French Photonics Days existent depuis maintenant 3 ans. Coorganisées par Photonics France avec SupOptique Alumni et les associations locales, cet évènement annuel met en avant les compétences photoniques au sein d'une région et valorise celles-ci sur le plan national. Cette quatrième édition a été menée en région Auvergne Rhône-Alpes avec Minalogic et le Cluster Lumière. Plus de 150 participants étaient présents pour assister aux conférences et débats, visiter les entreprises locales (Manutech SD, Thales Angénieux, Viavi Solutions) et échanger avec les exposants venus présenter leurs services.

L'objectif de ces rencontres est d'exposer à un large public technique mais non spécialisé les différents aspects de la photonique dans les trois domaines majeurs du thème retenu : « Photonique pour l'affichage, l'éclairage et le Manufacturing ». Les conférences couvrent à la fois les avancées technologiques et les perspectives marchés.

Une table ronde a également abordé les questions de formation et d'emploi au sein de la filière photonique française pour répondre aux besoins des acteurs en matière de métiers et de compétences.

Merci à tous les participants, organisateurs et nos sponsors pour avoir fait de ces journées une belle réussite !

## PHOTONICS FRANCE RENCONTRE BRUNO BONNELL

Le 27 octobre dernier, Thierry Dupoux, président de Photonics France, et Ivan Testart, directeur général de Photonics France, ont rencontré Bruno Bonnell, secrétaire général pour l'investissement auprès de la Première ministre Elisabeth Borne.



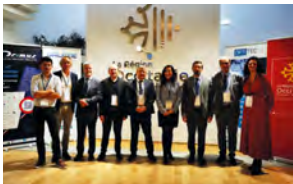
L'entretien avait pour but d'intégrer la photonique dans le programme France 2030 qui prévoit de consacrer plus de 54 milliards d'euros pour soutenir les capacités de production de l'industrie française et répondre aux défis technologiques à venir.

La filière photonique a toute sa place dans ce programme. Elle répond aux enjeux de transition écologique et numérique, en proposant de multiples solutions dans l'environnement, l'énergie photovoltaïque, l'agriculture, l'alimentation, la santé, les mobilités, les télécommunications, la défense ou l'industrie du futur... La filière est aussi très impliquée sur les thématiques du Plan Quantique, notamment avec l'ordinateur et les télécommunications quantiques.

Se posant comme promoteur de la filière, Bruno Bonnell a cité à plusieurs reprises la photonique parmi les filières de pointe de l'industrie française lors de son audition le 2 novembre 2022 par la commission des affaires économiques du Sénat. Il contribue ainsi à faire entendre notre voix auprès des pouvoirs publics et des acteurs économiques.

## Retour sur la Journée Job Dating dédiée aux métiers de la Défense et du Spatial

Le 12 octobre dernier, nous avons eu le plaisir d'accueillir plus de 400 participants à la journée Job Dating dédiée aux métiers de la Défense et du Spatial à l'Hôtel de Région à Toulouse.



Organisée par Le Cluster PRIMUS Défense & Sécurité, le Pôle de Compétitivité OPTITEC, le Club Galaxie et les sociétés CEGELEC Défense & XERIUS, avec le soutien du Ministère des Armées, de la Direction Générale à l'Armement (DGA) et de la Région Occitanie, cette rencontre a permis de mettre en relation les talents de demain avec

les acteurs industriels, étatiques et académiques de la filière Défense & Spatial.

La journée a débuté par un discours d'ouverture en présence de Marc Sztulman (Conseiller Régional d'Occitanie et Président de Cyber'Occ), David Lenoble (Responsable ministériel de la politique PME et ETI - Sous-directeur PME et action régionale chez DGA), Marc Ricci (Directeur Général du Pole Optitec), Albert CERRO (Secrétaire Général Club GALAXIE Toulouse), Gilles Laborde (Président Cegelec Défense) et Loubna El MAHMOUDI ZAÏR (Fondatrice ELMA Agency).

Après le discours d'introduction, une **table ronde sur la thématique « Les Dispositifs d'accompagnement du Ministère des Armées et de Pôle Emploi aux profits des industriels de Défense »** a été animée par Bruno JOSSE (PRIMUS), Pierre FOULQUIER (Chef du bureau de développement des PME de défense au ministère des armées à la DGA), Françoise GANNA (Chargée de prospection et de relation employeurs chez Défense Mobilité) et Charlotte ELLENA (Chargé de mission chez Pôle emploi).

Enfin, une **session de pitches** a permis aux entreprises telles qu'**AIRBUS Défense spatial, XERIUS, SPHEREA, THALES, CEGELEC Défense, DERICHEBOURG et SYMETRIE** de présenter leurs activités.

En parallèle un **espace dédié au Job Dating** a permis à plus de 400 participants de rencontrer les industriels et les partenaires académiques de la filière.

Contact : Christophe CAMPERI-GINESTET, Directeur Général Adjoint Opérations - christophe.camperi@pole-optitec.com

## Retour sur le salon SIANE

Le Pôle OPTITEC était présent au salon SIANE, sur l'espace Pad'Occ - Vitrine Industrie du futur d'Occitanie qui intègre toutes les nouvelles technologies innovantes liées à la production industrielle. Pad'Occ est une plateforme novatrice pour accompagner les industriels vers l'Industrie du futur en Occitanie.

Sur le salon nous avons assisté à la présentation du Plan France 2030 par Bastien Espinassous - DREETS Occitanie - Directeur adjoint responsable du pôle Entreprises, Emploi, Economie et Jalil Benabdillah - Vice-président de La Région Occitanie / Pyrénées-Méditerranée en charge de l'économie, de l'emploi et de la réindustrialisation. Le Plan France 2030 est un plan d'investissement de 54 milliards d'euros pour bâtir la France de demain. Il prend la suite du plan France Relance et du PIA et il est destiné à soutenir l'innovation. Il consiste en une série d'appels à projets nationaux et régionaux, ceux-ci étant opérés conjointement par les services du Préfet de Région (DREETS) et du Conseil régional Occitanie.



Contact : Christophe CAMPERI-GINESTET, Directeur Général Adjoint Opérations - christophe.camperi@pole-optitec.com

## AGENDA

### ■ Photonics west Du 31 janvier au 02 février 2023 à San Francisco, USA

Photonics West est le rendez-vous incontournable de l'industrie de l'optique-photonique pour prospecter le marché américain et rencontrer les décideurs clés du secteur.

Plus d'infos sur :  
<https://www.pole-optitec.com/missions/view/19>

### ■ Global industrie

#### Lyon 2023 Du 7 au 10 mars 2023 à l'Eurexpo, Lyon

Global Industrie est l'événement qui couvre l'ensemble de l'industrie

Plus d'infos sur :  
<https://www.pole-optitec.com/missions/view/30>

### ■ Salon International de l'Aéronautique et de l'Espace

#### Du 19 au 25 juin 2023 au Bourget à Paris

Le Salon International de l'Aéronautique et de l'Espace est organisé par le SIAE, filiale du Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales (GIFAS).

Plus d'infos sur :  
<https://www.pole-optitec.com/missions/view/220>

### ■ LASER World of PHOTONICS Du 27 au 30 juin 2023, Munich - Allemagne

Organisé tous les deux ans, Laser World of Photonics est le salon leader mondial pour les composants, les systèmes et les applications photoniques.

Plus d'infos sur :  
<https://www.pole-optitec.com/missions/view/23>

## En bref

**Hemeria développe un Ballon captif dans le cadre des JO de Paris 2024**

Hemeria développe un système de surveillance par l'intermédiaire d'un ballon captif dans le cadre d'une expérimentation en vue des JO 2024. Un projet innovant d'une des pépites du Hub Optics & Photonics.

## Photonics

**Excellence Day #4  
La journée annuelle  
du Hub Optics &  
Photonics a eu lieu  
le 24 novembre 2022 !**

Organisée en partenariat avec le Forum de la Photonique, nous nous sommes rassemblés le 24 novembre 2022 pour la journée annuelle du Hub Optics & Photonics.

Cette année le sujet choisi était la photonique au service de l'environnement : une technologie innovante au service d'un sujet sociétal dans l'ère du temps. Ponctué de diverses sessions (Analyse de l'Environnement, Consommation et Energie, Gestion & Tri des Déchets), les participants ont pu profiter d'une journée enrichissante avec des technologies aussi impressionnantes les unes que les autres ! Rendez-vous l'année prochaine pour notre prochaine journée annuelle.

## AGENDA

■ **Introduction to quantum technologies and quantum photonics**

25 janvier 2023, Université de Technologie de Troyes, France  
(Inscriptions sur le site de PhotonHub Europe : [photonhub.eu/trainings-list](http://photonhub.eu/trainings-list))

■ **Impulse 2023**

09 février 2023, Conseil Régional d'Ile de France, 2 Rue Simone Veil, 93400 Saint-Ouen

[www.systematic-paris-region.org/evènements/](http://www.systematic-paris-region.org/evènements/)

## Un Champion Optics & Photonics : Damae Médical Systematic Paris-Région dévoile ses 5 champions 2022 : Axelor, Axem Technology, Damae Medical, Mediane Systeme, Secure Ic



Systematic Paris-Region distingue chaque année depuis 2011 une sélection de PME innovantes, membres actifs du Pôle, qui se démarquent par leur potentiel d'innovation, leur croissance régulière et solide, leur développement à l'international et l'ambition de leurs dirigeants. Cette année, Axelor, Axem Technology, Damae Medical, Mediane Systeme et Secure Ic rejoignent le club sélectif des Champions du Pôle Systematic, portant désormais à 66 le nombre total de PME distinguées depuis 2011.

Le label Champion est décerné au terme de plusieurs étapes rigoureuses (présélection, analyse chiffrée et auditions) par un comité présidé par Fadwa Sube, co-fondatrice d'Optiva Capital.

Au total, 60 entreprises Deep Tech portent le label « Champion ».

Elles cumulent plus de 11500 emplois créés, et une présence dans 35 pays.

## Un Prix Nobel au sein du Hub Optics & Photonics

**Alain Aspect, membre du Hub Optics & Photonics, reçoit le Prix Nobel de Physique 2022 !**



Alain Aspect est professeur à l'Institut d'Optique Graduate School, Chercheur au CNRS (Centre national de la recherche scientifique), président du jury du Prix Jean Jersphagnon, ainsi que co-fondateur de PASQAL.

C'est une figure unique de notre écosystème : qui, dans notre communauté, n'a pas eu l'opportunité de bénéficier de son savoir à l'école, dans les labos de recherche ou dans le milieu entrepreneurial ? Alain Aspect a été, est, et continuera certainement à être un mentor pour bon nombre d'entre nous !

Bravo à lui, et à tous ceux qu'il a entraînés dans son sillage ! Une preuve de plus que le quantique est aujourd'hui une technologie phare des années à venir !

**Vous souhaitez rejoindre  
le Hub Optics & Photonics Systematic ?  
Une question ? Un renseignement ?**

Contactez Najwa Abdeljalil,  
Coordnatrice du Hub :  
[najwa.abdeljalil@systematic-paris-region.org](mailto:najwa.abdeljalil@systematic-paris-region.org)



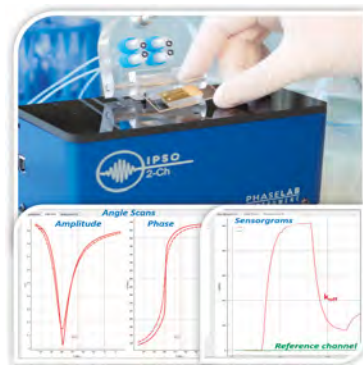
## Nano-optics & Nanophotonics (NANO\_PHOT) Graduate school

# Phaselab Instrument, un nouveau venu sur le champ de la biodétection, partenaire de la graduate school

Phaselab Instrument propose une nouvelle famille de SPR ultra-compact adapté à des usages multiples. Des systèmes complets pour les laboratoires et l'enseignement sont proposés.

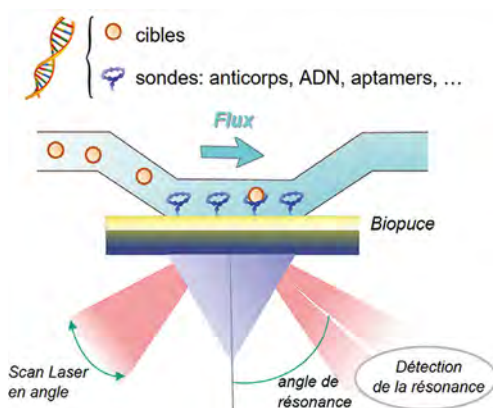
Installé à côté du campus, et fort de plusieurs brevets issus de l'université de Technologie de Troyes (UTT), Phaselab collabore avec les chercheurs de la graduate school et met à disposition sa technologie pour des étudiants masters et PhD de l'école Nano-Phot. Qu'il s'agisse de détecter des cibles virales, des éléments biotoxiques comme des métaux lourds, des pesticides, ou d'autres substances bio-chimiques, cette plateforme abordable et simple d'usage offre des atouts pour l'enseignement, les laboratoires ou des usages de type POCT (Point of care testing).

Pour plus de renseignements : <https://www.phaselabinstrument.com/>



Phaselab Instrument innove en matière de détection SPR. Avec un instrument ultra compact, à moindre coût, fonctionnant sur USB. Avec la taille d'un appareil reflex, et un poids inférieur à 1kg, le dispositif offre cependant une mesure ellipsométrique unique, pour une précision accrue.

## Des biopuces SPR pour la détection de métaux lourds...



Dans son stage de recherche avec le L2n (UTT, Troyes) et SEBIO (URCA, Reims), Antoine Elie, étudiant du master Nano-Phot, fonctionnalise les puces SPR avec des séquences d'ADN spécifiques (aptamer) permettant une détection ultra-sensible du mercure dans l'eau. Le SPR permet non seulement la détection de traces mais permet aussi d'évaluer l'affinité entre l'Aptamer développé et l'ion métallique.

Le phénomène de résonance de plasmon de surface (SPR) apparaît en éclairant à un angle spécifique une fine couche d'or : l'amplitude du champ réfléchi s'effondre, et la phase de l'onde varie abruptement. Cette résonance se décale à mesure que des cibles s'accrochent à la surface.

## ACTUALITÉS

Cet été, NANO-PHOT a sponsorisé deux conférences majeures :

### NFO16

The 16<sup>th</sup> International Conference on Near-Field Optics, Nano-photonics and Related Techniques, Victoria, BC, Canada 29 août-2 sept.) où, en particulier, Renaud Bachelot a donné un cours « probing the optical near-field ».

### NanoPlasm (13-17 Juin, Cetraro)

Où NANO-PHOT a décerné deux prix à de jeunes scientifiques pour l'excellence de leurs réalisations. Un jury international a sélectionné les deux lauréates :

**Erika Cortese**, Université de Southampton (UK) : « Effets non locaux sur le confinement de champ nanoscopique dans les systèmes polaritoniques ».

**Silvia Rotta Loria**, Politecnico di Milano (Italie) : « Réponse optique ultra rapide des films de nitrure de titane : révélation des processus de relaxation des électrons chauds ». Félicitations à toutes les deux !

### Promotion 2022/23

Le 16 septembre, la promotion de NANO-PHOT a été chaleureusement accueillie, à Reims, par les chercheurs du LRN et du L2n. Après une brève présentation de NANO-PHOT par Renaud Bachelot et Louis Giraudet, les étudiants ont pu profiter d'une visite guidée de la Cathédrale et de la cave de Champagne Pommery. Nous sommes très heureux d'accueillir cette promotion internationale.

Il y a actuellement 32 étudiants au sein de NANO-PHOT : 6 M1, 15 M2 et 11 doctorants

### Programme d'échange

Nous avons eu le privilège d'accueillir, au L2n de l'UTT, Dr. Ankur GUPTA de l'Indian Institute of Technology, Jodhpur (IITJ), en septembre 2022 pour développer et mettre en place des programmes d'échange d'étudiants (Master et PhD) et des collaborations de recherche.

## Journée PHAROS sur « Les communications sécurisées »

**A**LPHA-RLH et Aerospace Valley ont organisé le 15 septembre 2022 à l'Aéroport de Brive une journée PHAROS\* sur le thème « *Les communications sécurisées pour l'Aéronautique, le Spatial et la Défense* » qui a rassemblé près de 70 participants.

L'état de l'art, les tendances et les défis technologiques ont été abordés avec des interventions autour des RF, du LiFi, des communications spatiales, du Lidar, du radar et de la goniométrie de THALES, XLIM, LATÉCOÈRE, TéSA, SpaceAble, Airbus Defence & Space et CISTEME, ainsi qu'une étude de cas sur la communication avec les drones.



La journée s'est achevée avec la visite du nouveau bâtiment, dédié aux hyperfréquences, de la société Inoveos à Brive, et la démonstration du DAEM (Détecteur d'Agresions ElectroMagnétiques).

\*PHAROS : *Photonique, Hyperfréquences, AéRONautique et Spatial*

### AGENDA

■ **Salon Photonics West**  
31 janvier au 2 février 2023  
à San Francisco

■ **IoT Solutions World Congress**  
31 janvier au 2 février 2023  
à Barcelone

Tous les événements sur  
[www.alpha-rlh.com](http://www.alpha-rlh.com)

## Sébastien Barré, nouveau Président du pôle ALPHA-RLH



Lors du forum des adhérents du 16 juin dernier, Sébastien Barré a été élu nouveau Président du pôle.

Ingénieur et Docteur de l'Université de Technologie de Compiègne, il a fait toute sa carrière à la Direction des applications militaires (DAM) du CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives).

Il débute en 1998 sur le centre Le Ripault près de Tours, puis rejoint en 2006 le Cesta installé près de Bordeaux au sein du service en charge de la production et de la maintenance des armes, puis en qualité de chef de projet « Armes en Service ». En 2018, il devient Chef du département conception et réalisation des expérimentations puis est nommé Directeur adjoint des armes nucléaires en 2020. Il est directeur du CEA/Cesta depuis le 1<sup>er</sup> juillet 2022.

## ALAIN ROUSSET REÇOIT LE PRIX INTERNATIONAL « ADVOCATE OF OPTICS 2021 » (OPTICA)

**L**e 21 novembre, dans les locaux de l'Institut d'Optique d'Aquitaine à Talence, Alain Rousset, président de la Région Nouvelle-Aquitaine, recevait le prix « Advocate of Optics » décerné par Optica, qui assure le développement et la promotion de l'optique et de la photonique dans le monde entier.



© photo : Gauthier Dufau

Il lui a été remis par Gérard Mourou, prix Nobel de Physique 2018, en présence d'Hervé Floch, Directeur Général du pôle ALPHA-RLH.

Alain Rousset est le premier Français à recevoir cette distinction internationale qui récompense 24 années d'engagement en faveur de la filière photonique en Nouvelle-Aquitaine.

En 1996, le Ministère de la Défense a lancé le projet du Laser Mégajoule (LMJ) près de Bordeaux dans le cadre du programme Simulation visant à pérenniser la crédibilité de la dissuasion française en l'absence d'essais nucléaires nouveaux. Élu président de la région Nouvelle-Aquitaine en 1998, Alain Rousset a capitalisé sur cette infrastructure optique-laser pour favoriser la construction d'un écosystème de recherche et d'innovation et d'une économie autour de l'optique et des lasers, plus largement de la photonique.

Cela a conduit à la création d'une antenne de l'Institut d'Optique Graduate School (IOGS) à Talence, du pôle de compétitivité Photonique et Hyperfréquences ALPHA-RLH, du centre de formation PYLA, du centre de transfert de technologie ALPhANOV, du programme laser PETAL et de plus de 50 start-ups dans le domaine de la photonique dans la région de Bordeaux.

## À LA DÉCOUVERTE DE L'ÉCOSYSTÈME QUÉBÉCOIS



**F**in octobre 2022, le pôle ALPHA-RLH a organisé une semaine de mission au Canada dans l'objectif de faire découvrir l'écosystème québécois des *deep tech* à plusieurs entreprises et laboratoires néo-aquitains.

Les sociétés AUREA Technology, GLOphotonics, Inoveos, Leukos, Prâna R&D, ILEE ainsi que le Naquidid Center et le centre technologique ALPhANOV ont pu rencontrer des acteurs de la recherche, notamment le centre de recherche appliquée OPTECH à Montréal et le centre

d'expertise INO à Québec dans le domaine de l'optique-photonique.

Par le biais de diverses visites, les participants ont pu découvrir une approche inspirante qui permet de construire des chaînes de valeur intégrées avec des acteurs complémentaires qui travaillent ensemble pour accompagner la montée en gamme des innovations technologiques.

Par ailleurs, pour pallier la pénurie de talents et de ressources dans le domaine scientifique et technologique, le Canada soutient massivement l'innovation avec des programmes de financement pour appuyer les entreprises dans la réalisation de leurs projets d'innovation, réalisés au Québec ou avec des partenaires étrangers.

Cette mission aux côtés de la délégation de la Région Nouvelle-Aquitaine et du pôle d'excellence québécois Optonique pourrait donner lieu à de futurs projets d'implantation au Québec.

## Les *deep tech* pour relever les défis de demain

La 8<sup>ème</sup> édition d'INPHO Venture Summit a réuni les 13 et 14 octobre 2022 au Palais de la Bourse à Bordeaux un réseau unique d'entreprises, d'investisseurs privés et de start-ups, soit plus de 160 participants en provenance principalement des États-Unis et d'Europe.



Organisé par le pôle ALPHA-RLH, l'expert en innovation BLUMORPHO et le CEA/Cesta, INPHO 2022 avait pour objectif d'échanger sur les opportunités d'investissement et de collaborations dans les technologies à impact. Les *deep tech* étaient au cœur de l'évènement, notamment avec l'Intelligence Artificielle, la cybersécurité, les semi-conducteurs, le quantique, la décarbonation, le New Space... qui visent à relever les défis majeurs de notre monde.

INPHO 2022, ce sont 50 intervenants de renommée internationale (Schlumberger, Hyundai, Dassault Aviation, Bosch, Schneider Electric, Google...), 20 start-ups sélectionnées pour pitcher et 3 ateliers sur les thèmes « Quantum computing », « Industrial production » et « Data management ».

Hervé Floch, Directeur Général du pôle, a remis le prix de la start-up la plus prometteuse et un chèque de 5000 € à la société suisse Xsensio pour sa solution de surveillance continue des hormones et des protéines.

L'évènement a notamment été soutenu par la Région Nouvelle-Aquitaine, Bordeaux Métropole, la CCI Bordeaux Gironde, la SEML Route des Lasers, le centre d'innovation dédié aux technologies quantiques Naquidid Center, ainsi que par les projets européens PhotonHub Europe et Oasis. La prochaine édition se tiendra à Bordeaux en octobre 2024.

## Les fibres optiques à l'honneur à Limoges



Les 23 et 24 novembre 2022, les Journées « Fibres Optiques » ont accueilli à Limoges la communauté d'experts de la filière photonique-laser du pôle ALPHA-RLH. Près de 120 personnes du monde industriel et de la recherche étaient réunies au Conseil Départemental de la Haute-Vienne.

Les 19 intervenants\* ont pu dresser le panorama académique autour des fibres optiques en France, partager les dernières avancées sur les technologies fibres optiques et présenter les applications dans les domaines du quantique, des lasers et des capteurs. Un espace d'exposition a permis à 12 structures, dont 8 adhérents du pôle, de promouvoir leurs activités et leurs technologies.

Les participants ont poursuivi les échanges lors d'une soirée cocktail networking et profité d'un concert avec le pianiste Edouard Ferlet, qui allie musique et innovation technologique, dans le cadre du Festival de Jazz « Eclats d'Email » à l'Opéra de Limoges. En clôture de cet évènement de 2 jours, l'institut de recherche XLIM et les sociétés GLOphotonics et LEUKOS ont ouvert leurs portes pour faire visiter leurs installations autour des fibres optiques et des sources laser supercontinuum.

Merci à nos sponsors CEA, GLOphotonics, SEDI-ATI, LEUKOS et ALPhANOV pour leur soutien.

\*XLIM, IRCICA, ICMCB, Bloom Lasers, Luzilight, AUREA Technology, CEA Cesta, ALPhANOV, Photonics Bretagne, Amplitude Laser, Le Verre Fluoré, IDIL Fibres Optiques, GLOphotonics, ixblue, Silentsys, Menhir Photonics, Naquidid Center, SEDI-ATI.

# Hommage à Jean-Marc Fournier

**Alain ASPECT, Pierre CHAVEL, Maxime JACQUOT, Robin KAISER, Philippe LALANNE, Gilles PAULIAT, au nom des nombreux collègues et amis de Jean Marc.**

**N**ous avons appris avec une immense tristesse le décès subit de Jean-Marc Fournier le 27 septembre à l'âge de 78 ans. Jean-Marc était un spécialiste d'optique physique et de ses applications. Il a travaillé sur l'imagerie 3D, et l'holographie, sur le piégeage optique, et a été un grand spécialiste de la photographie interférentielle de Gabriel Lippmann.

Enthousiasmé par l'étude de l'optique au cours de ses études à l'Université de Franche-Comté, il y soutient en 1970 sa thèse de 3ème cycle sur le « Traitement optique de l'information appliqué à la mesure de ressemblance et à la classification des formes voisines » au sein du Laboratoire d'Optique de Besançon, dont la continuité fait maintenant partie de l'Institut FEMTO-ST. Il y contribue ensuite aux travaux d'holographie, enregistrant en particulier des hologrammes de grande taille ou/et de scènes vivantes. En 1976, il participe ainsi à la réalisation du célèbre hologramme de la Vénus de Milo, de 1,5 m de hauteur par 1 m de large ! Il devient alors un acteur et témoin clé du développement de l'holographie en France et en Europe. Un séjour à Virginia Tech en 1977 lui ouvre l'horizon américain et le conduira même à Hawaï. En 1979, il crée avec J-L. et G. Tribillon la société Hololaser à Besançon. Ce fut le début d'une aventure magique qui aboutit à une collection d'hologrammes époustouflante, dont certains ont été remontrés en 2015 à l'exposition holographique à Besançon [1].

En 1982 s'ouvre pour lui une période d'activité intense et enthousiasmante de près de vingt ans ayant rencontré Edwin Land, fondateur de Polaroid, qui a créé et financé de ses deniers le Rowland Institut for Science à Cambridge. Les chercheurs doivent y consacrer la totalité de leurs travaux mais jouissent d'une grande liberté pour leurs choix de thèmes. Les résultats scientifiques les plus marquants de Jean-Marc datent de cette époque ou en sont les prolongements. Il faut avant tout citer les nombreuses expériences « d'Optical Binding », variété de piégeage optique où une modélisation fine des interactions électromagnétiques entre un champ d'interférences et des nanoparticules permet d'identifier des zones de stabilité (voir par ex. Réf. [2]) : on peut parler de matière à cohésion optique. Il exploitera cette veine jusqu'à la publication, en 2014 avec son collègue T. Grzegorzcyk, d'une démonstration de miroir parabolique qui illustre (à une échelle encore fort modeste) l'idée lancée dès 1979 par A. Labeyrie de constituer des miroirs de télescopes ultralégers par piégeage optique [3]. C'est aussi pendant cette période que Jean-Marc étudie en détail la photographie interférentielle de Lippmann dont il essaie de comprendre et reproduire la qualité de son impression visuelle.

Mais entretemps, après le décès d'Edwin Land, le financement du Rowland Institut s'était tari vers 2002. D'abord chercheur invité au Laboratoire Kastler Brossel et à l'École polytechnique



© Ludovic Godard

fédérale de Lausanne, Jean-Marc développe une seconde passion des pinces optiques pour le piégeage des atomes. Il sera ensuite consultant jusqu'à sa retraite, déployant sa curiosité sur des projets multiples, souvent industriels, tout en poursuivant sa passion de la « matière optique » et de l'histoire de l'holographie, à laquelle s'ajoute désormais prioritairement celle du procédé Lippmann de reproduction des couleurs.

En 2008, il a entrepris de commémorer le centenaire du Prix Nobel attribué à Gabriel Lippmann par une série d'expositions au Palais de la découverte, au Grand-Duché du Luxembourg et à l'ENS Cachan. Il a passé de très longs moments à concevoir, trouver le financement puis monter en grande partie lui-même ces expositions scientifiques, mais aussi esthétiques, afin que tout soit parfait. La récompense est venue avec les dizaines de milliers de visiteurs qui ont déambulé dans ces expositions successives. Jean-Marc a aimé partager sa passion. Spécialiste de Gabriel Lippmann, il avait une connaissance parfaite de la photographie Lippmann jusque dans les moindres protocoles expérimentaux et avait réussi à les maîtriser. Il fut un scientifique passionné, expérimentateur ayant le souci du détail et de la beauté de la physique et des expériences. Jean-Marc a partagé son savoir avec tous, lors de cafés des sciences et de conférences à destination de ses confrères ou du grand public.

Nous aimons nous souvenir de Jean-Marc pour ses contributions scientifiques, mais également pour les longues discussions sur la physique et sur la transmission du savoir entre générations. Nous adressons notre profonde sympathie à son épouse Janine ainsi qu'à leurs enfants, Yvan, Boris et Barbara. ●

## RÉFÉRENCES

[1] <https://actu.univ-fcomte.fr/article/voyage-dans-la-troisieme-dimension-002470#.Y0Zx1VLP1v1>

[2] M.M. Burns, J.P. Fournier, and J.A. Golovchenko, Phys. Rev. Lett. **96**, 113903 (1996).

[3] T.M. Grzegorzcyk, J. Rohner, and J.M. Fournier, Phys. Rev. Lett. **112**, 023902 (2014).



# CRÉATION DU GDR CHALCO, GROUPEMENT DE RECHERCHE DÉDIÉ AUX MATÉRIAUX CHALCOGÉNURES

**R**appelons que les matériaux chalcogénures sont des composés non-oxydes contenant au moins un élément chalcogène, c'est à dire des atomes de soufre S, sélénium Se ou tellure Te. Ces éléments qui figurent dans la colonne 16 du tableau périodique, n'incluent ni l'oxygène ni le polonium. Ils sont le plus souvent associés à des éléments métalliques et/ou métalloïdes tels que As, Si, In, Sb, Sn, Ge ou Ga. Ces matériaux possèdent des propriétés physiques et chimiques remarquables et sont exploités industriellement par exemple dans les mémoires résistives de la microélectronique, l'optique infrarouge, ou bien les batteries solides sur des enjeux sociétaux d'importances : transition écologique, capteurs environnementaux et bio-médicaux, stockage d'énergie, etc.

Au niveau académique, de nombreux groupes de recherches cherchent à tirer parti de leurs propriétés dans des domaines aussi divers que le neuromorphisme, l'optique non-linéaire, la thermoélectricité, la chimie douce, le photovoltaïque ou bien encore la spin-orbitronique.

En janvier 2022, un nouveau GDR du CNRS a été créé autour des enjeux liés à ces matériaux particuliers afin de fédérer une communauté scientifique nationale nombreuse mais naturellement hétérogène au vu de la diversité des thématiques de recherche et des champs d'applications. Ce GDR interdisciplinaire, soutenu par 3 instituts du CNRS (l'Institut de Physique, l'Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes, et l'Institut de Chime), a pour mission de créer un maillage vertical de la recherche fondamentale aux applications et transverse et visant à



décloisonner les différents champs d'applications des matériaux chalcogénures.

Le GDR CHALCO (<https://gdrchalco.cnrs.fr/>) a organisé ses premières journées scientifiques à Dijon les 20 & 21 Juin 2022 au sein du Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (UMR CNRS 6303). Ces journées ont été ponctuées par des exposés sollicités issus du monde académique et industriel, des présentations de synthèse par l'équipe d'animation du GDR, ainsi que de nombreuses contributions de la communauté scientifique. Les 80 participants, issus des diverses communautés ont pu échanger leur différents points de vue sur le développement des concepts, des méthodes et des enjeux en lien avec les matériaux chalcogénures tant du point de vue fondamental que technologique ou instrumental.

Le GDR CHALCO proposera en 2023 une séquence de webinaires réguliers dédiés à la présentation des activités et des moyens au sein des laboratoires académiques du domaine. Les prochaines journées scientifiques du GDR sont d'ores et déjà programmées à Bordeaux les 6-7 juin prochains. ●



# L'ignition : un pas décisif pour la fusion

**Sébastien LE PAPE**

Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses, CNRS, École polytechnique - Institut Polytechnique de Paris, CEA, Sorbonne Université, 91128 Palaiseau cedex, France

<https://doi.org/10.1051/photon/202211716>

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.

Cinquante ans après la première publication de John Nuckolls décrivant le principe de la Fusion par Confinement Inertiel à l'aide de lasers de puissance, l'ignition a été atteinte sur le National Ignition Facility (NIF) au Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL). Dans la nuit du 5 décembre 2022, des réactions de fusion ont dégagé 3,15 MJ d'énergie nucléaire, pour 2,05 MJ d'énergie laser, soit un gain de l'ordre de 150 %.

L'énergie libérée dans une réaction de fusion est directement reliée à la différence de masse entre les atomes fusionnant - deux isotopes de l'hydrogène : le deutérium et le tritium - et le produit de cette fusion - un atome d'hélium et un neutron - conformément à la formule d'Albert Einstein  $E=mc^2$ .

Produire ces réactions de fusion est un vrai défi car les noyaux doivent vaincre une répulsion naturelle due à leurs charges toutes deux positives. Pour contrer cette répulsion, il faut apporter au milieu fusible une quantité d'énergie élevée en le chauffant à des températures extrêmes, de l'ordre de 100 millions de degrés Celsius. Si l'on veut que l'énergie dégagée par les réactions de fusion soit supérieure à l'énergie investie pour les initier, il faut que la quantité de neutrons produits soit suffisante ; un critère établi par John Lawson dit que le produit entre la densité du milieu et la durée durant laquelle les noyaux restent proches (temps de confinement) doit alors être le plus grand possible. Dans le cas de la Fusion par Confinement Inertiel, avec des temps de confinement assez courts, de l'ordre de 0,1 milliardièmes de secondes, la densité du milieu doit être de l'ordre de mille fois la densité du solide.

Pour atteindre ces conditions, un grand nombre de faisceaux laser irradiant les parois internes d'un cylindre en or/uranium appauvri d'un centimètre de longueur et, en les chauffant, transforment ces parois en plasmas émetteurs de rayonnement X. Ces rayons X implosent alors de manière sphérique une capsule de diamant, d'environ 2 millimètres de diamètre, par effet fusée, à une vitesse avoisinant les 400 km/s. Le milieu fusible deutérium-tritium contenu dans la capsule est comprimé et, en son centre, porté à la bonne température.

Les premières expériences sur le NIF, de 2009 à 2012, n'ont pas été concluantes, avec un dégagement d'énergie neutronique de seulement quelques kJ. Les faibles performances de ces implosions furent alors imputées à la présence d'instabilités hydrodynamiques, liées à des non-uniformités d'irradiation, agissant comme des glaçons dans un bol d'eau chaude, refroidissant le point chaud et empêchant de fait un grand nombre de réactions de fusion de se produire. Une fois ce problème identifié, des modifications

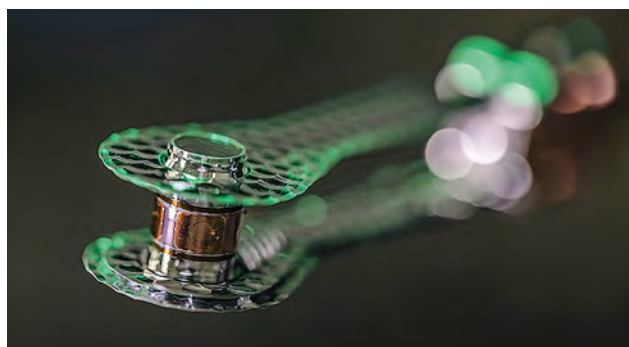


Figure 1 : Cible tirée sur le NIF. © National Ignition Facility

apportées à la forme temporelle de l'impulsion laser ont permis de multiplier par 10 les performances de ces implosions (2013-2016). Les années suivantes (2017-2019), avec l'avènement des capsules en diamant remplaçant les capsules en plastique utilisées au préalable, ont vu le rendement du four à rayons X et la symétrie de l'implosion grandement améliorés, ce qui a, à peu de choses près, permis de définir la cible actuelle. Néanmoins ces implosions souffraient encore d'un refroidissement intempestif du point chaud, dû non plus à la croissance d'instabilités hydrodynamiques mais à la qualité de fabrication des capsules en diamant. La présence de cavités de taille micronique à l'intérieur de leur paroi a ainsi pendant longtemps réduit la performance des implosions en induisant l'injection dans le point chaud d'éléments non fusibles ou froids.

Un capillaire en verre de 10 microns de diamètre, servant à remplir la capsule avec le combustible Deutérium-Tritium (DT), était également à l'origine d'un mélange néfaste ; en réduisant sa taille de 10 à 5 puis 2 microns de diamètre, la masse de carbone ou de DT froid injecté lors de l'implosion a été réduite, conduisant aux performances actuelles.

Ces 13 années de recherches sur le NIF ont donc permis d'atteindre l'ignition en alliant compréhension des phénomènes physiques dégradant les performances (instabilités hydrodynamiques, interaction laser-plasma, symétrie de l'implosion) et amélioration de l'ingénierie de l'ensemble cible/laser (augmentation de l'énergie laser et contrôle de sa mise en forme temporelle, capsule en diamant, capillaire en verre).

Le NIF est une installation laser conçue initialement pour des applications défense, tout comme le Laser Mégajoule à Bordeaux. Pour

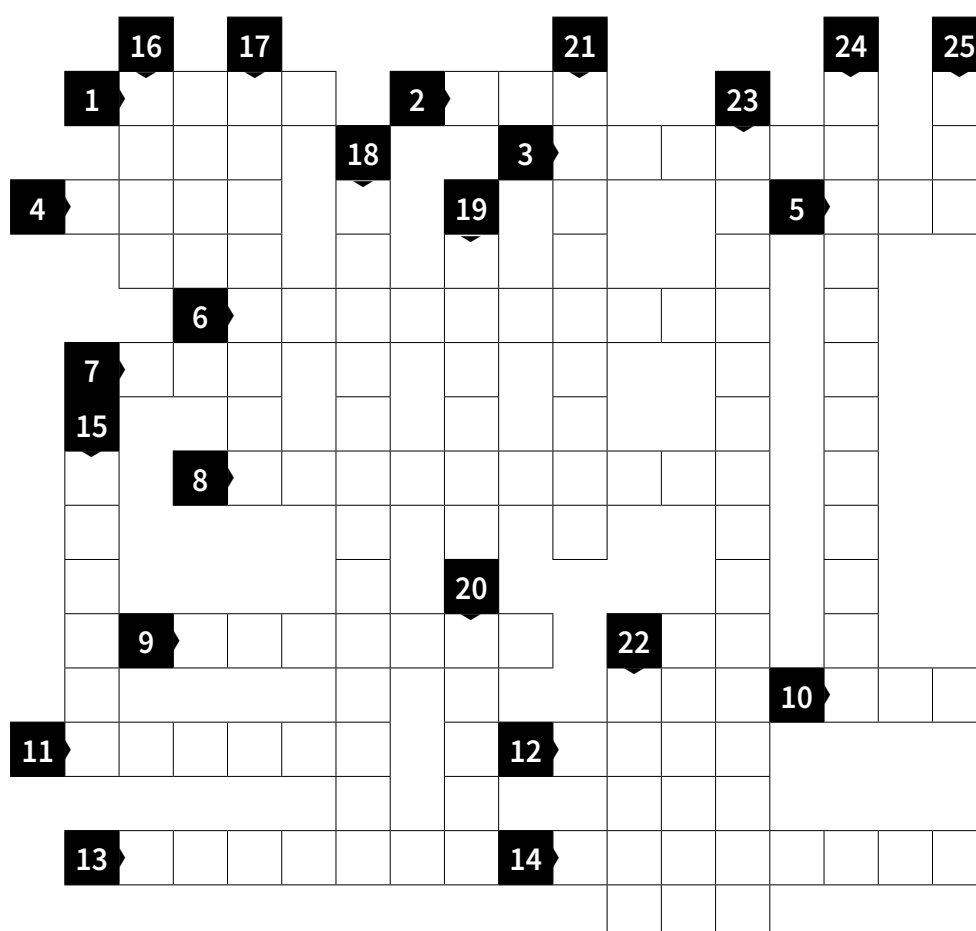
envisager la fusion comme source d'énergie viable, de nombreux points d'ingénierie restent à résoudre : augmenter la cadence de tir des lasers pour atteindre 10-15 tirs par seconde, réduire le coût des cibles utilisées, réfléchir avec la communauté de la fusion par confinement magnétique aux problèmes de résistance des matériaux

dans ces environnements extrêmes et enfin augmenter de manière significative l'énergie de fusion générée par chaque implosion (à environ 100 fois l'énergie laser pour que le processus soit rentable). Atteindre l'ignition n'est que la première étape sur la longue route vers la fusion pour l'énergie, mais il s'agit une étape cruciale. ●

# MOTS CROISÉS

## SUR LE THÈME DE L'ASTROPHOTONIQUE

Par Philippe ADAM



SOLUTION SUR  
PHOTONIQUES.COM



- |    |  |    |  |
|----|--|----|--|
| 1  | Technologie pour détecteurs et capteurs              | 14 | Couple satellitaire                            |
| 2  | Opère à Pasadena ... et dans l'espace                | 15 | Mesure le bruit ambiant... de l'univers        |
| 3  | Peut être aussi adaptative                           | 16 | Opérateur spatial français                     |
| 4  | Un œil à quelques millions de kilomètres             | 17 | Qualifie une station alternative et périodique |
| 5  | Grand Photonicien Spatial !                          | 18 | Cacher ce disque que je ne saurais voir        |
| 6  | Peut qualifier une enfance atmosphérique agitée      | 19 | Astronome américain... télescopique            |
| 7  | Prend le problème sous le bon angle                  | 20 | Les Piliers de la Création en est une célèbre  |
| 8  | Vivier de sœurs jumelles pour la Terre               | 21 | Pionnier de l'imagerie électronique            |
| 9  | Monde lointain                                       | 22 | Optical Payload for Lasercomm Science          |
| 10 | Fenêtre pour observer                                | 23 | Technique spatialisée avec LISA                |
| 11 | Configuration télescopique                           | 24 | Découpage d'image par région d'intérêt         |
| 12 | Les surfeurs sur site n'échappent pas à son objectif | 25 | Orbite à 400 km au-dessus de nos têtes         |
| 13 | Œil de poisson dans l'espace                         |    |  |

# LIAISON PAR FIBRE OPTIQUE DE 1023 KM POUR COUPLER 2 HORLOGES ATOMIQUES ENTRE PARIS ET TURIN

Une équipe de recherche internationale a mis au point un lien par fibre optique de 1023 km entre les instituts de métrologie de Paris et de Turin pour la diffusion des signaux issus d'horloges atomiques, sans dégradation de leur précision. Cet outil fiable et robuste est indispensable aux nouveaux développements de métrologie comme le développement d'échelles de temps plus précises basées sur des fréquences optiques. Les laboratoires de métrologie comme le LNE-SYRTE à Paris ou l'INRIM à Turin détiennent des horloges atomiques extrêmement performantes utilisées pour maintenir les échelles de temps qui servent de référence au niveau français et international, comme le Temps Atomique International. Afin de pouvoir comparer les signaux délivrés par ces horloges, il est nécessaire qu'elles puissent communiquer entre elles. La technique utilisant des réseaux de satellites étant devenue trop imprécise par rapport à la stabilité en fréquence des meilleures horloges atomiques, une autre option s'est développée consistant à utiliser les réseaux de fibre optique.

Une collaboration franco-italienne entre le Laboratoire de physique des lasers (LPL, CNRS / Université Sorbonne Paris Nord), Systèmes de Référence Temps-Espace (SYRTE, CNRS / Observatoire de Paris – PSL / Sorbonne Université), le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) et l'Istituto nazionale di ricerca metrologica (INRIM) à Turin vient de démontrer le fonctionnement quasiment sans interruption pendant quatre mois d'une liaison par fibre optique de 1023 km entre les instituts métrologiques italien et français. C'est la première fois qu'une liaison d'une telle longueur fonctionne 24 heures sur 24 aussi longtemps, ce qui montre son potentiel à offrir un service scientifique en continu. La partie française s'appuie sur l'infrastructure de recherche REFIMEVE qui permet de disséminer sur plus de 6000 km de liens optiques sur tout le territoire national, via le réseau de fibres optiques de RENATER, la stabilité et l'exactitude des références nationales temps-fréquence élaborées par le LNE-SYRTE.

Le faisceau d'un laser asservi à l'horloge atomique de référence est injecté dans la fibre optique sur un des canaux réservés du multiplex, les autres restant utilisés pour transmettre les données de télécommunications sans perturbation du signal. Tout au long du parcours, des stations relais permettent de répéter le signal pour l'injecter d'un lien à un autre. Les bruits induits par les fluctuations thermiques et les vibrations acoustiques, qui sont susceptibles de dégrader le signal transmis, sont compensés avec un système électronique.

La liaison franco-italienne a permis de comparer pendant quatre mois les horloges atomiques au Cs, Rb et Yb des deux pays, soulignant le potentiel des liens optiques fibrés pour évaluer les bilans d'incertitude de ces horloges. La caractérisation de l'incertitude induite par l'utilisation du lien optique (inférieure à  $6.10^{-19}$ ) conforte l'idée qu'il pourra être utilisé dans le



Schéma des liaisons par fibre optique permettant de transférer des signaux ultrastables de temps et de fréquence en France et dans les pays voisins. La liaison franco-italienne s'appuie sur l'infrastructure nationale de recherche REFIMEVE entre Paris et Modane. Crédit : C. Clivati et al., Phys. Rev. Applied **18**, 054009 (2022)

développement d'échelles de temps basées sur l'optique. En effet la définition actuelle de la seconde, reposant sur une transition atomique du  $^{133}\text{Cs}$  dans le domaine micro-onde, a une précision de l'ordre de  $10^{-16}$ . En utilisant plutôt des transitions dans le domaine optique d'atomes ou d'ions, cette précision pourrait atteindre  $10^{-18}$ . Des applications multiples en découleraient comme la mesure encore plus précise du champ gravitationnel terrestre ou des constantes fondamentales de la physique et le test des théories physiques au-delà du modèle standard. Ces résultats sont publiés dans la revue Physical Review Applied. De nombreuses autres applications des liens optiques, et en particulier de REFIMEVE, sont en cours d'exploration, notamment en photonique et en spectroscopie atomique et moléculaire de précision. ●

## SOURCE

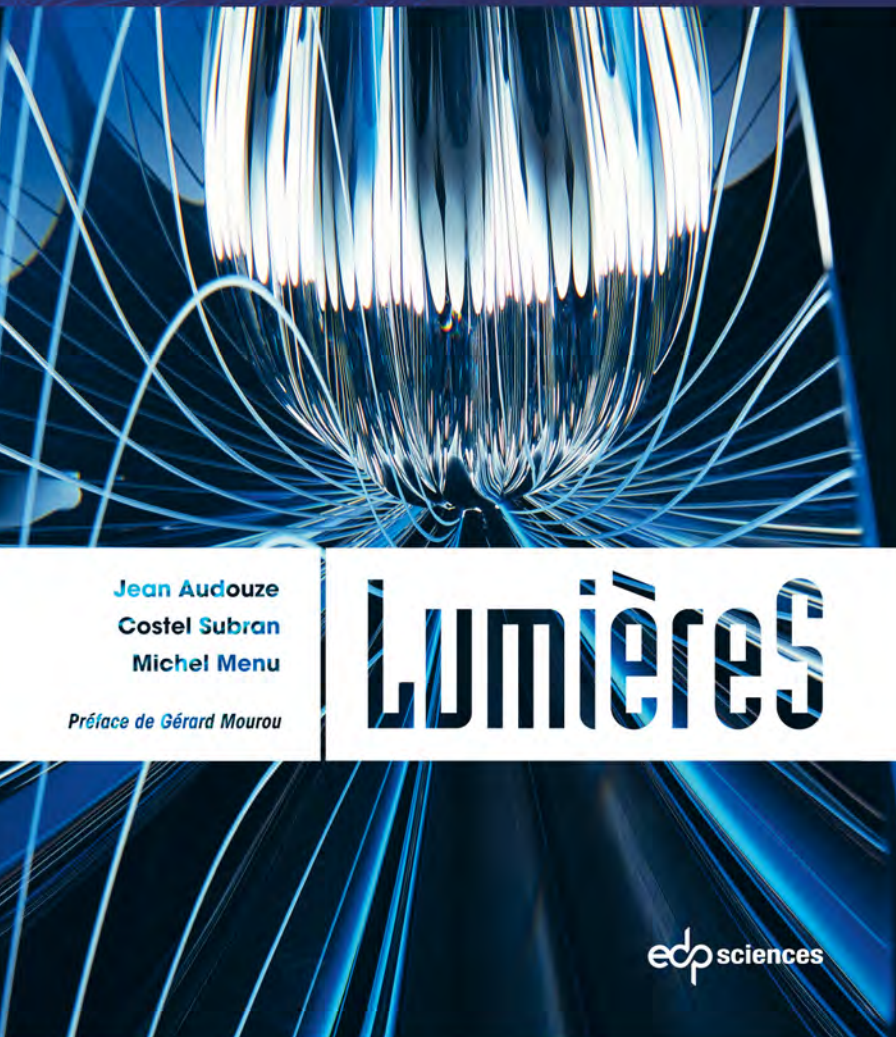
Actualité scientifique de l'Institut de physique du CNRS du 20/12/2022

## POUR EN SAVOIR PLUS

C. Clivati et al., "Coherent optical fiber link across Italy and France," Phys. Rev. Applied **18**, 054009 (2022)  
DOI: 10.1103/PhysRevApplied.18.054009  
<https://www.refimeve.fr/index.php/fr/>

"La photonique, nouvelle science et technologie de la lumière,  
sera au XXIe siècle ce que l'électronique fut au XXe siècle !"  
(Costel Subran)

# 'Lumières'



Trois auteurs prestigieux  
nous font découvrir la  
lumière comme nous ne  
l'avons jamais perçue :

- Jean Audouze :  
Les lumières du ciel
- Costel Subran :  
Lumière des lasers
- Michel Menu :  
Lumière et art

Finaliste du prix Roberval 2021

ISBN 978-2-7598-2363-5 - 240 pages, 29 €

En vente sur [laboutique.edpsciences.fr](http://laboutique.edpsciences.fr)

## Entretien avec François Cochard

**Photoniques s'entretient avec François Cochard, cofondateur et aujourd'hui directeur général de Shelyak Instruments, entreprise spécialisée dans la spectroscopie pour l'astronomie.**

### **SHELYAK EST UNE ENTREPRISE NÉE D'UNE PASSION POUR L'ASTRONOMIE**

Au départ, c'est un petit groupe de passionnés d'astronomie, réunis autour de Christian Buil – un pionnier de cette discipline – qui a conçu et réalisé le Lhires III, un spectroscopie dédié à l'astronomie. La spectroscopie astronomique offre un regard nouveau sur les étoiles et les objets du ciel (nébuleuses, galaxies...); et permet de passer de l'astronomie à l'astrophysique.

Cette discipline était jusque-là réservée aux observatoires professionnels. Aujourd'hui, même avec un matériel modeste, on peut faire de la mesure physique (pression, température, composition chimique, mouvements) sur les étoiles – c'est tout simplement fascinant. En mettant la spectroscopie à la portée des astronomes amateurs, nous avons ouvert la porte à de nombreuses collaborations entre amateurs et professionnels. Le succès de cet instrument a été tel qu'il a conduit à la création de Shelyak Instruments en 2006. Depuis, c'est toute une gamme d'instruments qui a été réalisée et distribuée dans le monde entier, aussi bien pour des astronomes amateurs que professionnels.

### **QUELLES ONT ÉTÉ LES GRANDES ÉTAPES DE DÉVELOPPEMENT DE SHELYAK ?**

L'entreprise a été créée en 2006, avec deux fondateurs. Nous avons eu une croissance régulière jusqu'en 2016, date à laquelle j'ai repris seul les rênes. Dans les années qui ont suivi nous avons renforcé la structure de l'entreprise, avec la mise en place d'un ERP, le remplacement de notre site web – outil essentiel

dans notre secteur – et plusieurs recrutements qui se sont concrétisés début 2022. L'année 2021 a été une année record en termes de chiffre d'affaires (890K€). Notre plan stratégique, financé par BPI France (et une subvention de la région Auvergne Rhône-Alpes), devrait nous conduire à un doublement des ventes dans les 5 prochaines années.

### **LE MARCHÉ VISÉ EST CLAIREMENT INTERNATIONAL**

L'astronomie est une discipline profondément internationale; la curiosité pour le ciel et l'infini existe quelle que soit la culture ou le pays, et la recherche dans ce domaine dépasse largement les frontières. Nous avons déjà expédié nos instruments dans une soixantaine de pays. C'est aussi un marché pour lequel le bouche à oreille (le réseau!) est essentiel; on se développe au gré des rencontres faites grâce à nos clients, plus que par une stratégie de conquête pays par pays qui est souvent recommandée par les experts du développement commercial à l'international.

### **VOS CLIENTS REGROUPENT AUSSI BIEN DES AMATEURS QUE DES PROFESSIONNELS DE L'ASTRONOMIE**

Oui, et c'est à la jonction entre ces deux communautés que notre activité trouve tout son sens: en ayant accès à ces deux univers, on permet les collaborations scientifiques qui sont notre motivation première. Les professionnels apportent leur expertise, et les amateurs leur disponibilité, leur réactivité et leur



enthousiasme – c'est très complémentaire. Cela nous apporte aussi une variété infinie de clients; on peut parler le même jour avec un débutant en spectroscopie puis avec un chercheur expert qui travaille sur les plus grands instruments au monde. Concrètement, ces deux marchés ont à peu près le même poids dans notre CA, mais avec nettement plus de clients amateurs, puisque le panier moyen est plus modeste.

### **COMMENT SE COMPOSE VOTRE GAMME DE PRODUITS ?**

Nous travaillons actuellement à simplifier notre segmentation de marché. Il y a d'un côté la gamme « initiation », dont la vocation est d'offrir des produits abordables

*L'année 2021 a été une année record en termes de chiffre d'affaires (890K€). Notre plan stratégique, financé par BPI France (et une subvention de la région Auvergne Rhône-Alpes), devrait nous conduire à un doublement des ventes dans les 5 prochaines années.*

*Les professionnels apportent leur expertise, et les amateurs leur disponibilité, leur réactivité et leur enthousiasme – c'est très complémentaire. Cela nous apporte aussi une variété infinie de clients ; on peut parler le même jour avec un débutant en spectroscopie puis avec un chercheur expert qui travaille sur les plus grands instruments au monde.*

et faciles à mettre en œuvre, pour qu'un maximum d'astronomes franchisse le pas de la spectroscopie. Et par ailleurs, nous avons la gamme « Performance », qui vise une clientèle plus exigeante et pour qui la performance optique et la productivité sont essentielles. Dans ce secteur les instruments sont de plus en plus utilisés à distance.

Par ailleurs, nous avons aussi quelques produits qui ne sont pas directement liés à la spectroscopie, mais qui restent destinés au marché de l'astronomie.

#### VOS PRODUITS EN SPECTROSCOPIE POURRAIENT INTÉRESSER

#### D'AUTRES MARCHÉS APPLICATIFS

Nos instruments ont pour la plupart une architecture optique classique (une fente, une optique collimatrice, un

élément dispersif, et un objectif), mais la spectroscopie appliquée à l'astronomie a quelques spécificités. La première est que l'instrument doit se monter derrière un télescope qui se déplace sur le ciel. Il doit donc être compact, léger et très rigide. La seconde est que l'on doit disposer d'un système de pointage et de guidage, pour être certain d'observer la bonne étoile, et d'envoyer un maximum de photons dans le spectroscopie. Enfin, même lorsque ces conditions sont réunies, les photons ne sont pas nombreux et on doit veiller à avoir la meilleure efficacité possible pour des observations que qualité (avec le meilleur rendement signal / bruit possible).

Alors pour répondre à votre questions, oui, nos instruments peuvent toucher d'autres marchés (on a déjà vu quelques « détournements » intéressants), mais

on ne cherche pas activement à nous diversifier pour le moment, parce qu'il y a encore beaucoup à faire dans le secteur de l'astronomie que l'on connaît bien.

#### QUELLE EST LA STRATÉGIE DE FABRICATION DE VOS PRODUITS ?

Pour la plupart de nos instruments, nous avons toujours quelques unités en stock, de manière à livrer rapidement. Nous privilégions les fournisseurs locaux quand cela est possible, mais nous savons aussi chercher beaucoup plus loin des composants optiques critiques que l'on ne peut pas trouver localement.

L'assemblage et le réglage des instruments sont faits en interne.

#### QUELS SONT VOS OBJECTIFS ?

On est actuellement dans la réalisation du plan stratégique établi fin 2021. Pour développer l'entreprise, on travaille sur deux axes principaux.

Le premier concerne le développement de nouveaux produits pour l'astronomie (les idées ne manquent pas !). Le second consiste à renforcer nos actions de communication, avec un site web au goût du jour, une présence accrue sur les réseaux sociaux, un accompagnement plus fort de nos distributeurs dans le monde. ●



**LA FLEXIBILITÉ ET L'EXPERTISE  
AU SERVICE DE L'INNOVATION**

# LED UV

LED / MODULES LED / SOLUTIONS DÉDIÉES  
SERVICE SUR MESURE / POUR PETITES À GRANDES SÉRIES

**CARACTÉRISTIQUES**  
De 255nm à 405nm - Boîtier CMS ou traversant - Longues durées de vie  
Différents angles de distribution optique disponibles

**NOUVEAUTÉ**  
WICOP UVC forte densité mW/mm<sup>2</sup> - 275nm - CMS - Sans bonding  
Dimensions : 0,96 x 0,60 mm - Large choix de modules standards  
jusqu'à 820mW

**APPLICATIONS**  
Décontamination - Stérilisation surfaces, fluides et air  
Analyse de gaz - Spectroscopie - Curing - Fluorescence  
Effets spéciaux - Forensic - Détection de contrefaçon...

Société HTDS - info@htds.fr - www.htds.fr - Tel : +33 (0)1 64 86 28 28





## Entretien avec Thierry Dupoux

**Thierry Dupoux est Président de Photonics France et Directeur de l'Innovation chez Safran Electronics & Defense.**

### VOUS AVEZ COMMENCÉ VOTRE CARRIÈRE À LA DGA AVANT D'INTÉGRER SAFRAN E&D.

J'ai obtenu mon diplôme d'ingénieur de SupOptique en 1991, après un DEA de Physique Théorique. J'ai débuté ma carrière professionnelle à la DGA avant de rejoindre SAGEM en 1995, devenue par la suite SAFRAN. J'ai eu la chance d'occuper des postes très différents qui m'ont permis d'acquérir une expérience riche et je crois complète, avant d'accéder au poste de Directeur de l'Innovation.

### COMMENT AVEZ-VOUS ÉTÉ AMENÉ À VOUS IMPLIQUER DANS PHOTONICS FRANCE ?

La Photonique de défense (aussi appelée Optronique) est l'un des cœurs de métier de Safran Electronics & Défense. C'est principalement dans ce domaine que j'ai développé mon expertise et mon expérience chez Safran. En tant que leader du domaine, Safran a toujours soutenu la filière photonique nationale en étant un adhérent actif du syndicat professionnel, l'AFOP. J'ai rejoint le Bureau de l'AFOP en 2014.

Lorsque l'AFOP et le CNOP ont décidé de fusionner en 2018 pour plus de lisibilité, de visibilité et d'efficacité, on m'a proposé de devenir le premier Président de la fédération française de la Photonique, Photonics France. C'est avec plaisir et motivation que j'ai accepté.

### QUELLES ONT ÉTÉ LES GRANDES ACTIONS MENÉES PAR PHOTONICS FRANCE DEPUIS SA CRÉATION ?

En tant que membre du CA de l'AFOP, j'ai participé activement à l'analyse et à la construction du projet de fusion de l'AFOP et du CNOP. La filière était mûre en 2018 pour opérer cette fusion et les

conditions de succès étaient donc réunies. Il ne s'agissait pas d'une révolution mais bien d'une évolution. Rassembler les acteurs de la filière au sein d'une maison commune, pour être plus représentatifs, plus lisibles, plus visibles et plus efficaces. Cette fédération a la volonté de rassembler, pas d'intégrer ; c'est-à-dire qu'elle s'est dotée de statuts et d'une organisation permettant de mutualiser des moyens, des actions, des services pour plus d'efficacité, tout en préservant au sein de nos commissions notamment, une vraie liberté d'action.

### QUELLES SONT LES FORCES DE LA FILIÈRE PHOTONIQUE FRANÇAISE ?

La performance et le dynamisme de la filière française sont mondialement reconnus. La filière nationale représente près de 20 Md€ d'activité, générés par plus de 1000 entreprises. Une croissance annuelle de plus de 10 % qui surperforme la croissance mondiale. Ces performances sont rendues possibles grâce à la qualité de notre formation et de notre recherche. Cette excellence scientifique a conduit à l'émergence depuis 10 ans de nombreuses start-up qui se solidifient et se développent au fil des années. Plusieurs d'entre elles sont des références mondiales. Nous avons également un tissu industriel historique et solide composé de grands groupes et d'ETI qui sont des leaders dans leur domaine, qu'il s'agisse d'applications civiles ou militaires. Mais soyons clairs, nous ne devons pas nous reposer sur ces lauriers. Tous les pays industriels ont bien compris l'importance de la Photonique et les enjeux de souveraineté



qui vont avec. La question n'est pas de consolider ces résultats mais bien de faire encore mieux dans un contexte où la compétition va s'exacerber ! Pour adresser cette ambition, nous devons être organisés et solidaires et Photonics France a un rôle important à jouer.

Enfin, la Photonique est un subtil assemblage entre, des technologies historiques, aussi anciennes que la science, comme l'optique, des technologies contemporaines comme les capteurs, les fibres optiques et les lasers et enfin des technologies de rupture comme la Photonique quantique. C'est indiscutablement une force qui permet de construire notre maison commune sur des fondations solides et saines.

*La filière nationale représente près de 20 Md€ d'activité, générés par plus de 1000 entreprises. Une croissance annuelle de plus de 10 % qui surperforme la croissance mondiale. Ces performances sont rendues possibles grâce à la qualité de notre formation et de notre recherche.*



### ET S'IL FALLAIT ÉVOQUER SES FAIBLESSES...

La Photonique est source de compétitivité dans tous les secteurs applicatifs : automobile, énergie, santé, agriculture, usine du futur... C'est à la fois une force et une faiblesse. C'est une force dans la mesure où la largeur du spectre applicatif est source de volume, de business et donc d'investissement. C'est une faiblesse si les besoins sont analysés et les priorités définies, verticalement, domaine par domaine. La robustesse et la pérennité d'une filière transverse comme la nôtre impose de mutualiser les besoins notamment sur les fondamentaux technologiques qui nécessitent des investissements importants sur le temps long.

### COMMENT PÉRENNISER LA FILIÈRE PHOTONIQUE ?

Nous devons faire connaître et reconnaître la filière photonique. Le dialogue avec les filières applicatives doit donc être permanent et nous devons leur démontrer qu'il est essentiel pour eux d'avoir à leur côté une filière photonique nationale forte et souveraine. Nous avons aussi besoin que l'état nous aide dans cette démarche en reconnaissant les filières technologiques transverses à leur juste valeur, en contribuant au financement de leur développement. Sur ce point aussi Photonics France a un rôle important à jouer. La filière électronique, qui est très comparable à la nôtre, a ouvert la voie. Enfin, regardons autour de nous, du côté de l'Allemagne notamment, et prenons modèle sur leur capacité à travailler en meute en rassemblant intégrateurs, équipementiers et laboratoires pour tirer vers le haut les filières technologiques.

### QUELLES SONT LES ACTIONS À MENER POUR ÉTABLIR UNE FEUILLE DE ROUTE CLAIRE ET VISIBLE EN PHOTONIQUE ?

Il est important de mesurer régulièrement l'activité et la performance de notre filière. Photonics France a publié cette année une mise à jour des chiffres clés de la filière nationale. L'anticipation est un enjeu particulièrement important pour les filières

technologiques qui structurellement ont des cycles de recherche et de développement plus longs. Le dialogue avec les filières applicatives doit nous permettre de faire cet exercice. Nous avons en 2018 présenté une première version du plan stratégique photonique qui, à partir de l'analyse des besoins des filières intégratrices, présentait les grandes orientations des feuilles de route par sous-domaines (senseur, optique, laser...). Nous commencerons en 2023 à remettre à jour ces feuilles de route et à présenter largement ce travail. La compétition est forte mais la tentation du repli sur soi serait une erreur. Nous devons poursuivre nos actions au niveau européen, notamment au sein de l'organisation Photonics 21, pour défendre la Photonique et les budgets qui y sont consacrés mais aussi bien sûr pour y porter la voix de la filière française et y défendre nos intérêts et priorités.

### QUELS SONT LES AXES D'AMÉLIORATION EN FORMATION ?

Comme je l'ai dit précédemment, notre filière photonique en est là, grâce à notre recherche et à notre formation. Je parle ici de la formation supérieure. Le navire amiral de cette formation supérieure reste l'Institut d'Optique Graduate School de Palaiseau. Quand une filière se développe et que son activité croît partout sur le territoire, il est essentiel de disposer d'un réservoir de ressources compétentes pour couvrir l'ensemble des besoins industriels : recherche, développement et production, sur l'ensemble du territoire.

L'enjeu de notre filière pour les 5 ans qui viennent est de 10 000 emplois par ans. La situation en France est tendue vis-à-vis de certaines catégories de ressources de niveau opérateurs et techniciens, donc au niveau bac professionnel et bac + 2/3. Nous avons pris à bras le corps ce sujet et Photonics France travaille en étroite collaboration avec les pouvoirs publics pour que des nouvelles formations soient mises en place au plus vite. La formation est un enjeu majeur, le développement très important de notre filière ces dix dernières années ne se poursuivra pas sans toutes les femmes et les hommes qui l'incarnent. ●

# The Big Lift

## HASO LIFT272

272x200 phase points  
20 Hz max frame rate



## HASO LIFT680

680x504 phase points  
30 Hz max frame rate



sales@imagine-optic.com  
+33 164 861 560



www.imagine-optic.com

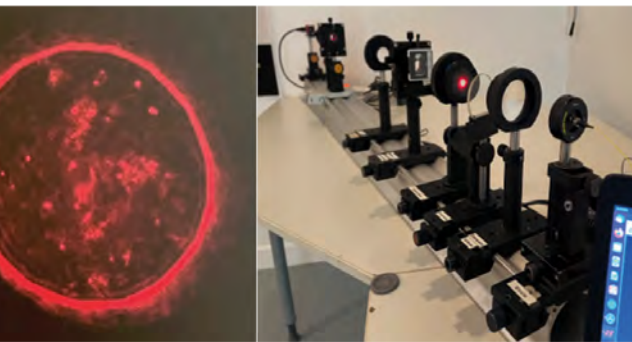
imagine  optic

# Coronographe des étoiles en laboratoire... et découvrir des planètes

**Pierre BAUDOZ**

LESIA, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université,  
Université Paris Cité, 5 place Jules Janssen, 92195 Meudon, France

[pierre.baudoz@obspm.fr](mailto:pierre.baudoz@obspm.fr)



**Éteindre une étoile, voilà une drôle d'idée !**

**C'est pourtant que ce que l'on propose aux étudiants avec cette expérience. L'objectif est de comprendre le principe du coronographe appliqué à l'observation de planètes extrasolaires. Avec un montage simple, on démontre comment atténuer optiquement la lumière d'une étoile sans modifier l'image d'une planète extrasolaire qui orbite autour de cette dernière.**

<https://doi.org/10.1051/photon/202211724>

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.

**L**e critère de Rayleigh considère que l'on peut distinguer deux points distincts du champ de vue lorsque le maximum principal de l'image d'un des objets coïncide avec le minimum de l'autre image. Cette définition du pouvoir de résolution est incomplète si l'on n'ajoute pas que les sources doivent avoir le même éclairement. Prenons deux objets ponctuels d'éclairements très différents, la diffraction augmente significativement la distance minimale nécessaire pour les distinguer puisque la source faible n'est détectée que lorsqu'elle produit un éclairement significativement supérieur aux pieds de la tâche de diffraction de l'objet brillant.

Pour rétablir la capacité de distinguer les deux objets, il faut soit minimiser les pieds de la tâche de diffraction par des techniques d'apodisation (au risque de conserver l'objet central brillant en général trop

éblouissant pour les caméras) soit supprimer la lumière de la source centrale sans modifier la transmission du reste du champ de vue. C'est l'objectif de la coronagraphie.

## Un banc de démonstration

La coronagraphie est une technique qui permet donc d'augmenter la dynamique des observations en diminuant voire supprimant la lumière de l'objet placé sur l'axe central de l'instrument tout en modifiant au minimum la transmission du reste du champ de vue.

Son application étant principalement astronomique, elle est rarement enseignée dans les cursus optiques. Pourtant, elle ne comporte pas de difficulté conceptuelle et représente une très belle application des principes de diffraction de la lumière. Cette technique se trouve

de plus aujourd'hui au cœur des nouveaux instruments d'imagerie astronomique dans le contexte de détection de planètes extrasolaires. Par exemple, 2 des 3 instruments du télescope spatial James Webb lancé en décembre 2021 intègrent des coronographes et les 3 premiers instruments du futur télescope géant européen de 39m de diamètre en seront également équipés.

Nous avons développé un petit banc de démonstration au sein du laboratoire LESIA de l'Observatoire de Paris. Il est utilisé pour des enseignements au niveau Master 2 mais également pour des démonstrations grand public lors de portes ouvertes par exemple. Le banc démontre plutôt la coronagraphie stellaire qui est apparue dans les années 80 et qui a pris tout son essor depuis une vingtaine d'année avec son utilisation pour la détection de planètes extrasolaires (Voir encart).

## Montage expérimental

Le montage présenté en Figure 1 est constitué principalement de matériel de récupération. Il est très simple et peut être monté avec du matériel d'enseignement classique. Il est constitué de 4 lentilles convergentes plan-convexes, de 2 diaphragmes, d'une fibre optique mono-mode alimentée par un laser rouge à 630 nm qui simule une étoile et d'une petite caméra monochromatique qui permet d'enregistrer des images.

La fibre optique est placée au foyer d'une lentille pour simuler les rayons parallèles qui nous parviennent des étoiles toujours situées à de très grandes distances par rapport à la taille des télescopes. La deuxième lentille simule le télescope. Elle est couplée avec un diaphragme à iris qui définit la pupille du télescope et permet de faire varier son diamètre. On peut ainsi démontrer la variation de la taille de tache de diffraction avec le diamètre lors de visites grand public. Le diamètre de la pupille d'entrée est limité par l'aberration sphérique de la lentille « télescope » et par la distribution gaussienne du faisceau en sortie de la fibre. En effet, l'éclairement au niveau de la pupille du « télescope » doit être relativement plan pour simuler une observation astronomique. Avec des fibres monomodes standards et une

première lentille de focale 200 mm, le diaphragme du « télescope » doit être inférieur à environ 10 mm.

Au foyer du télescope, on va placer le masque coronagraphique qui est lui-même placé au foyer d'une troisième lentille qui permet de faire une image de la pupille d'entrée du télescope. Au niveau de ce plan, on place un deuxième diaphragme, le diaphragme de Lyot, qui permet de filtrer la lumière diffractée par le masque coronagraphique. La dernière lentille permet la focalisation de l'image de l'étoile sur une petite caméra CMOS monochrome de quelques centaines d'euros.

Le masque focal de Lyot est une diapositive classique utilisée pour des Travaux Pratiques de diffraction et vendue par les sociétés de produits éducatifs (Jeulin, 3B Scientific, Didalab etc). Celui qui est utilisé dans ce montage contient 9 disques opaques déposés sur une diapositive (diamètres de 0.1 à 1.8 mm). Cette diapositive est généralement utilisée en parallèle d'une grille de diaphragmes de même diamètre pour étudier le théorème de Babinet.

Pour démontrer l'intérêt de la coronagraphie, on peut ajouter une planète dans le montage optique. Il suffit pour cela d'introduire une lame à face parallèle en amont de la lentille simulant le télescope. Cette lame va créer une deuxième source en utilisant la double ●●●

**Figure 1 :** Photographie du montage expérimental. Au premier plan, l'écran montre l'image coronagraphique du système étoile-planète de laboratoire observé en simultané par la caméra.



Solutions de soudure optique pour le marché de la Photonique



### Nouvelle plateforme de fusion par laser CO2 LZM125A+ Fujikura

Soudure de 80 à 2.5mm de silice  
Tous types de fibres (LDF, PM, PCF, Zblan,...)  
Ablation, clivage et mode-stripping  
Tapers, ball lenses, fonctions spéciales



### Soudeuse FSM100P+ Fujikura

Soudure de 60 à 1.2mm de silice  
Mode PM avec End-View  
Fonctions spéciales intégrées  
Pilotable par PC via logiciel convivial



### Nouveau cliveur CT106+ Fujikura

Clive les fibres de 60µm à 1.2mm  
Option clivage angulaire réglable 0-15°  
Back-stop intégré  
Clamps de fibres motorisés et automatiques

## LA CORONOGRAPHIE

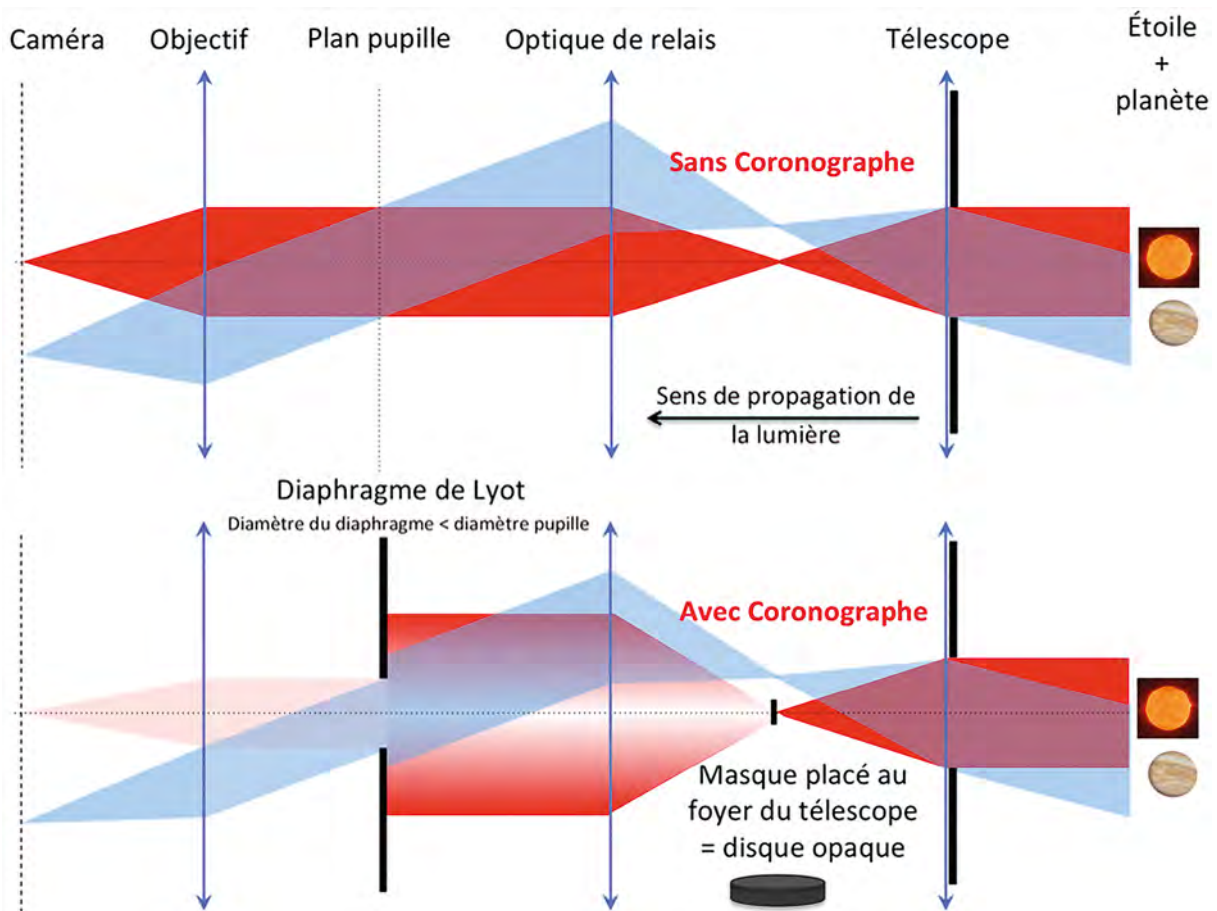
La **coronographie solaire** a été inventée par Bernard Lyot, astronome à l'Observatoire de Meudon, en 1930 [1]. La technique inventée par Lyot vise l'observation de la couronne solaire dont le rayonnement visible atteint à peine un millionième de celui de la photosphère solaire et qui, à l'époque, n'était observable que pendant des éclipses solaires. Le coronographe de Lyot est formé de deux éléments essentiels :

- un masque opaque dans le plan focal dont la taille est légèrement supérieure à l'image du disque solaire et qui bloque la majeure partie de la lumière solaire.
- Un diaphragme placé dans un plan pupille en aval du masque focal qui permet d'atténuer la diffraction du disque solaire

Contrairement au cas solaire, la **coronographie stellaire** veut éteindre une source ponctuelle.

En effet, les étoiles ont des diamètres inférieurs à la

résolution des télescopes actuels et pour la majorité d'entre elles, elles peuvent être comparées à des sources ponctuelles. De plus, l'angle qui sépare une planète et son étoile est très faible par rapport à la résolution angulaire des télescopes actuels. Pour prendre un exemple concret, si l'on plaçait le système solaire à une distance d'une dizaine d'années-lumière, l'angle séparant la Terre du soleil sera à peine 10 fois supérieur à la résolution des plus gros télescopes optiques actuels. On ne compte qu'une dizaine d'étoiles à moins de 10 années-lumière. Il faut donc prévoir d'observer des systèmes planétaires plus lointains et détecter des planètes situées à une distance angulaire de l'ordre de la résolution du télescope. La coronographie stellaire doit donc éteindre la lumière d'un objet ponctuel tout en optimisant la transmission d'un objet situé à quelques  $\lambda/D$  de l'étoile.



Principe du coronographe de Lyot appliqué à la détection de planètes extrasolaires.

réflexion vitreuse sur les deux surfaces de la lame. Le facteur de réflexion en intensité sur un dioptre silice/air est de 3,5%, on obtient donc avec une double réflexion une « planète » environ mille fois moins lumineuse que notre « étoile » de laboratoire. La distance entre les deux sources peut être modifiée en augmentant ou diminuant l'angle de la lame<sup>1</sup>.

## Montage expérimental

L'utilisation d'une petite caméra CMOS dont le temps d'exposition peut varier de quelques dizaines de microsecondes à quelques secondes permet d'enregistrer des images avec ou sans le coronographe sans saturer le détecteur. En général, on estime les performances d'un coronographe en calculant le rapport d'intensité entre l'image de l'étoile centrée sur le coronographe et l'image de l'étoile décalée par rapport au masque. Un exemple qualitatif est donné dans la Figure 2 où l'on a rassemblé des images enregistrées par la caméra pour un masque de 0.2 mm de diamètre avec un « télescope » de 5 mm de diamètre et 200 mm de focale.

L'effet du diaphragme de Lyot est évident sur les images coronographiques présentées dans la Figure 2. Dans cet exemple, le diaphragme de Lyot a un diamètre de 75% du diamètre initial de la pupille mais atténue d'un facteur 30 les effets de diffraction dans l'image et permet d'atteindre un contraste de  $10^6$  entre le maximum de l'image de l'étoile et l'intensité coronographique à  $10 \lambda/D$ . Le diaphragme diminue également la transmission d'une éventuelle planète mais d'un facteur 1,8 seulement.

Au centre des résidus coronographiques, on voit distinctement un point lumineux qui est connu pour avoir trois noms de scientifiques célèbres : tache d'Arago, de Fresnel ou de Poisson. En effet, l'existence d'un tel point lumineux centré sur l'ombre d'un masque occultant a été prédite théoriquement par Siméon Denis Poisson pour démontrer l'inexactitude de la théorie ondulatoire de la lumière proposée par Augustin Fresnel. L'effet fut inverse puisque François Arago observa expérimentalement l'existence de ce point et acheva de convaincre la majorité des scientifiques de l'époque de la nature ondulatoire de la lumière.

## Un instrument ultra-sensible aux aberrations optiques

Un des points clés du coronographe de Lyot est donc bien la présence d'un diaphragme dans le plan pupille aval du masque focal. Le montage permet de mettre en évidence visuellement l'anneau de lumière diffractée au niveau du bord de la pupille et pour lequel Lyot a proposé le diaphragme qui porte son nom (voir Figure 3). Sur cette même figure, on voit également des structures lumineuses dans la pupille qui sont créées ●●●

<sup>1</sup> La planète est cohérente avec l'étoile sur notre banc puisque nous avons choisi une source laser mais les effets coronographiques ne seront pas fortement affectés et ce montage permet de simuler simplement une source secondaire.

## FORMATION CONTINUE



**40 stages au catalogue**  
niveau débutant à confirmé



**stages sur mesure**  
pour répondre à vos besoins  
spécifiques



**formateurs experts**  
du monde académique  
et industriel



**enseignement  
expérimental**  
sur les 70 montages  
de la formation ingénieur



La certification qualité a été délivrée  
au titre de la catégorie d'actions suivantes :  
**Actions de formation**

<https://fc.institutoptique.fr>

✉ [fc@institutoptique.fr](mailto:fc@institutoptique.fr)

☎ +33 1 64 53 32 36 / +33 1 64 53 32 15

par les défauts des optiques qui sont utilisées sur le banc (aberrations, poussières, etc.). Dès ses premiers papiers sur la coronagraphie, Lyot s'est rendu compte qu'un coronographe permettait de mettre en évidence les défauts des optiques utilisées. C'est d'ailleurs cette méthode qu'il a appliquée pour tester toutes les optiques qu'il a intégrées dans les différents modèles de coronographe qu'il a construits de 1930 à 1938 [2]. Il a amélioré cette solution en 1941 en remplaçant le masque opaque par un masque qui déphase l'onde d'un quart de période indépendamment du test de contraste de phase proposé par Zernike. Cette technique, appelée test de Lyot, est particulièrement sensible aux aberrations de très hautes fréquences spatiales.

Cette sensibilité est aussi un inconvénient de la coronagraphie stellaire puisqu'aujourd'hui, c'est la qualité de la surface d'onde en amont des coronographes qui limite principalement leurs performances. Pour les observations des télescopes au sol, la qualité de la correction des optiques adaptatives limite le contraste obtenu à  $10^4$  à  $10^5$  (avant traitement des données). Dans l'espace, la qualité de surface des optiques limite les coronographes à des contrastes de  $10^6$  environ. Pour

atteindre des contrastes suffisants pour détecter des exoplanètes rocheuses comme la Terre (contraste de  $10^{10}$ ), la prochaine génération de coronographes spatiaux intégrera des miroirs déformables à très grand nombre d'actionneurs permettant de corriger les défauts résiduels de polissage des miroirs du télescope. L'objectif pour un projet comme le Roman Space Telescope qui devrait être mis en orbite en 2027 est d'atteindre une qualité de surface d'onde de quelques picomètres RMS sur les fréquences spatiales corrigées par les miroirs déformables.

### Un pointage très précis

Le montage permet également d'expliquer les opérations de pointage très précis de l'étoile sur le coronographe que requiert un coronographe (de quelques dixièmes à quelques centièmes de  $\lambda/D$ ). Pour cela, on a besoin de :

- 1) connaître la position du centre du coronographe,
- 2) connaître la position de l'étoile,
- 3) avoir un système précis permettant d'amener précisément l'image de l'étoile au centre du coronographe.

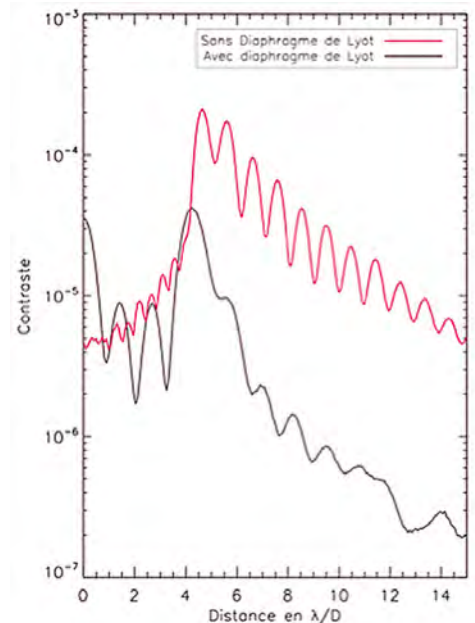
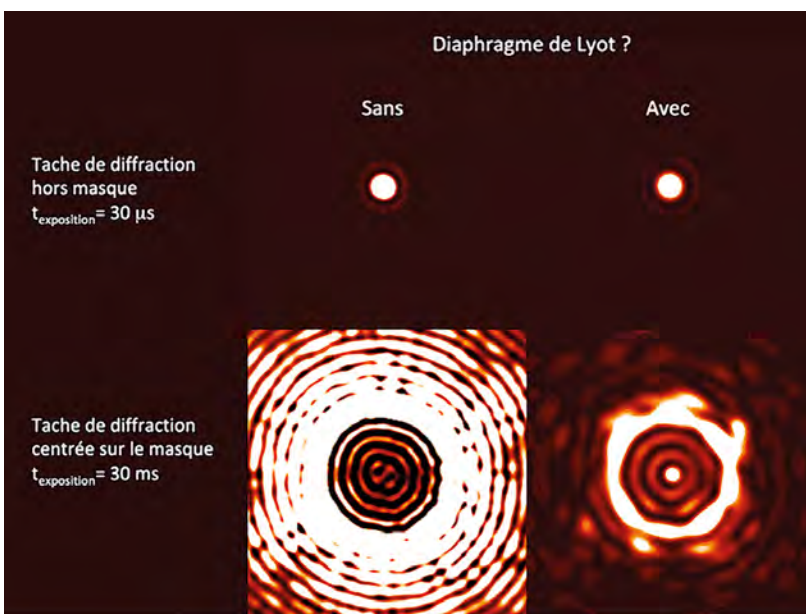
La position du coronographe sur la caméra est mesurée sur le banc en illuminant le masque focal avec une illumination uniforme (ici, on utilise une petite lampe LED placée à quelques centimètres devant le masque focal).

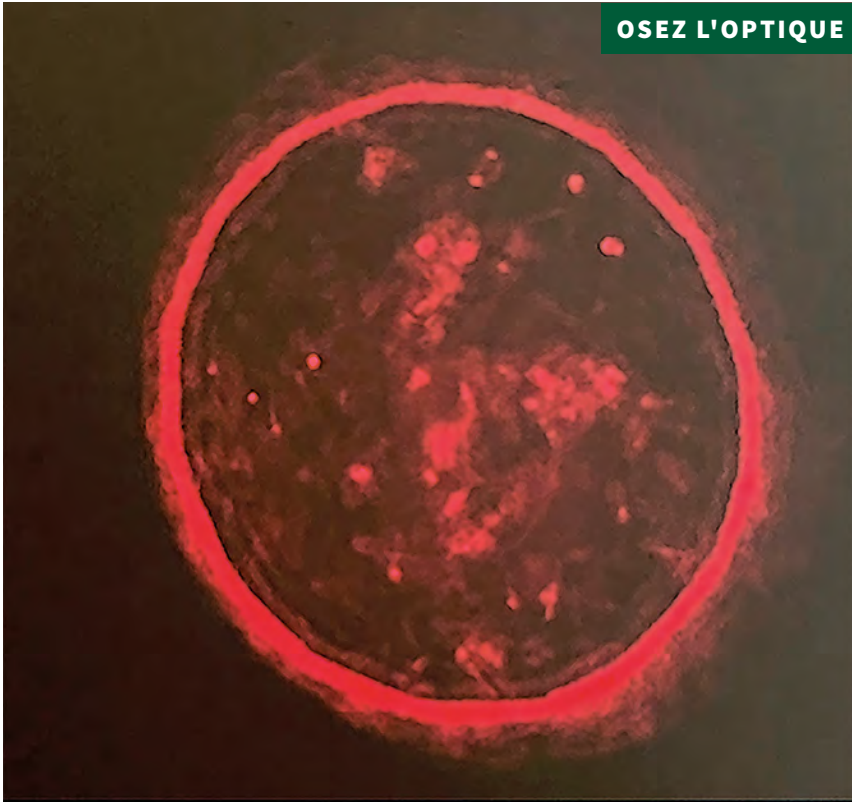
Sur le banc, le coronographe est mobile par rapport au télescope pour faire correspondre le centre du masque à la position de l'image de la source sur la caméra. Sur un télescope, le coronographe sera fixe par rapport au télescope et c'est le télescope que l'on bougera ou plus souvent un miroir de pointage précis (sur le télescope spatial Webb, le miroir de pointage est précis à 5 millisecondes d'angle soit  $2.4 \cdot 10^{-8}$  radians).

### Les coronographes plus complexes

Sur le banc, l'utilisation de masques de tailles différents permet de mettre en évidence les limitations du coronographe de Lyot. En réduisant à quelques millimètres le diamètre du « télescope » et en choisissant

**Figure 2 :** Gauche : Images enregistrées sur le banc pour plusieurs configurations. Le masque coronographique a un diamètre 8 fois plus grand que la résolution du « télescope ». Droite : Contraste entre les images avec et sans diaphragme de Lyot et le maximum de la tache de diffraction hors masque.





**Figure 3 :** Photographie enregistrée par un Smartphone de l'éclairage de la pupille au niveau du diaphragme de Lyot

le masque le plus petit (0,1 mm de diamètre), on peut démontrer que l'effet coronagraphique est limité lorsque le masque de Lyot a un diamètre inférieur à  $4-5 \lambda/D$ . Pour observer des exoplanètes orbitant au plus proche de leur étoile, il est donc nécessaire de remplacer le masque de Lyot opaque par des masques de phase permettant d'éteindre la lumière de l'étoile par interférences destructives.

Contrairement au coronographe de Lyot, ces masques peuvent éteindre complètement une étoile ponctuelle centrée sur le coronographe et observer en même temps l'environnement de l'étoile jusqu'à la limite de résolution théorique de l'instrument, c'est-à-dire  $\lambda/D$ . Ces masques sont les plus étudiés actuellement pour

la coronagraphie stellaire. Par exemple, on peut citer le masque de phase à quatre quadrants proposé par D. Rouan [3] dans les années 2000 et qui est utilisé sur un des instruments du télescope spatial James Webb [4] et qui a permis la première observation d'une planète extrasolaire dans l'infrarouge thermique [5] ou des masques composés d'un vortex optique de charge paire [6]. C'est la combinaison de ces masques coronagraphiques complexes et de la correction des défauts optiques au niveau du picomètre qui permettra d'ici quelques années d'étudier plus précisément les systèmes exoplanétaires les plus proches et de mieux comprendre les conditions d'apparition de la vie sur les planètes rocheuses qui les composent. ●

## RÉFÉRENCES

- [1] B. Lyot, C. R. Acad. Sci. Paris **191**, 834 (1930)
- [2] B. Lyot, C. R. Acad. Sci. Paris **222**, 51 (1946)
- [3] D. Rouan, P. Riaud, A. Boccaletti, *et al.*, Publ. Astron. Soc. Pac. **112**, 1479 (2000)
- [4] A. Boccaletti, C. Coussou, P. Baudoz *et al.*, Astron. Astrophys. **667**, A165 (2022)
- [5] A. Carter, S. Hinkley, J. Kammerer, *et al.*, Submitted to Astrophys. J. (2022)
- [6] D. Mawet, P. Riaud, J. Surdej, et O. Absil, Astrophys. J. **633**, 1191 (2005)

# OPTIQUES LASER ET SYSTÈMES OPTIQUES

POUR LES APPLICATIONS LASER HAUTE ENERGIE

- Lentilles sphériques et asphériques de précision
- Traitement IBS haute tenue au flux
- Expanseurs de faisceaux et systèmes optiques de focalisation
- Cristaux laser et non linéaires
- Cellules de Pockels et drivers haute tension



[www.eksmaoptics.com](http://www.eksmaoptics.com)

Représenté par:

**ARDOP**  
INDUSTRIE

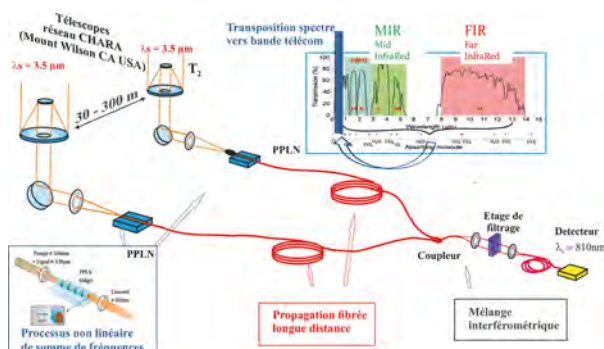
05.40.25.05.36 | [sales@ardop.com](mailto:sales@ardop.com)  
[www.ardop.com](http://www.ardop.com)

# ALOHA : L'OPTIQUE NON LINÉAIRE ET FIBRÉE AU SERVICE DE LA HAUTE RÉOLUTION EN ASTRONOMIE

Ludovic GROSSARD, François REYNAUD

XLIM PhoCal (Photonique Cohérente Non-linéaire et Laser) UMR 7252, CNRS, 87060 Limoges, France

\*francois.reynaud@unilim.fr



Le projet ALOHA propose une nouvelle génération d'instruments dédiés à l'imagerie haute résolution en astronomie. Celui-ci a pour objectif de relier un réseau de télescopes hectométrique par fibre optique en utilisant conjointement la somme de fréquence pour adapter le rayonnement astronomique à un dispositif optimisé avec des composants fibrés ou guidés issus de la bande télécom. Ce travail a été effectué au laboratoire XLIM et sur ciel à l'observatoire du Mount Wilson (CA USA).

<https://doi.org/10.1051/photon/202211730>

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.

L'imagerie à très haute résolution en astronomie nécessite la construction de réseaux de télescopes hectométriques voire kilométriques pour atteindre les résolutions angulaires nécessaires à l'étude d'objectifs astrophysiques tels que les exoplanètes, les noyaux actifs de galaxies ou la formation de jeunes étoiles. Le transport des faisceaux et la minimisation des perturbations de l'environnement constituent des enjeux majeurs pour les performances de l'instrument. L'acheminement de la

lumière des télescopes jusqu'au laboratoire de mélange interférométrique est traditionnellement réalisé par des jeux d'une vingtaine de miroirs plans. Outre les problèmes de réalignements journaliers, cela introduit des aberrations et des pertes qui dégradent significativement la sensibilité de l'instrument. C'est dans ce contexte que notre équipe a développé des techniques de transport de la lumière astronomique en utilisant des fibres optiques unimodales. Cette démarche a abouti en mars dernier aux premières franges d'interférence avec des liens fibrés

de 240 m reliant deux télescopes du réseau CHARA à l'observatoire du Mount Wilson en Californie. Pour étendre la portée de cette technique, nous avons développé en parallèle une méthode de transposition spectrale du rayonnement astronomique vers la plage telecom où les fibres ont des performances inégalées. Pour cela, un processus non linéaire de somme de fréquences est appliqué au rayonnement astronomique de puissance de l'ordre du fW dans un cristal PPLN pompé par un laser 1013 fois plus puissant que le rayonnement à convertir.



C'est le projet ALOHA (Astronomical Light Optical Hybride Analysis) qui associe interférométrie appliquée à l'imagerie haute résolution, optique non-linéaire et détection en régime de comptage de photons [1,2].

#### PRINCIPE DE LA MESURE ET PARAMÈTRES À MAÎTRISER

Un tel réseau de télescopes ne permet pas d'obtenir directement une image de la source observée mais analyse la cohérence mutuelle des rayonnements collectés par les différents télescopes grâce à un mélange interférométrique. En termes de traitement du signal, cela peut être interprété par la mesure de la corrélation ou degré de ressemblance entre les champs optiques qui permet d'échantillonner le spectre spatial de l'objet. Cela nécessite donc une très grande maîtrise de la symétrie entre les bras de l'interféromètre, constitué principalement par les fibres optiques reliant les télescopes à la station de

mélange interférométrique. Il est donc impératif de minimiser tous les effets différentiels de polarisation, dispersion, la structure spatiale et le temps de propagation. Ce dernier point est géré par des lignes à retard variables en position au cours de la nuit. Le contrôle de la structure spatiale conduit à l'utilisation de fibres unimodales. La maîtrise de la polarisation nécessite d'utiliser des fibres à maintien de polarisation dont les axes neutres sont soigneusement alignés en entrée et en sortie de fibre afin d'assurer la cohérence de polarisation. Pour ce qui concerne la dispersion différentielle, la symétrisation des guides met en œuvre une analyse spectrale afin de supprimer tous les ordres supérieurs ou égaux à 2 de la phase spectrale différentielle. L'ensemble de cette maîtrise instrumentale se traduit par un contraste instrumental qui, dans nos expériences, est supérieur à 90 % donc très proche de la valeur idéale de 1.

Le schéma de l'interféromètre implanté sur le réseau de télescopes CHARA du Mount Wilson en Californie [3] est représenté sur la Figure 1. Au niveau des télescopes, un dispositif de suivi de l'étoile et d'asservissement d'injection permet d'injecter la lumière collectée par le miroir primaire de 1 m de diamètre dans la fibre optique de diamètre de mode voisin de 10  $\mu\text{m}$ . Une optique adaptative permet de minimiser la distorsion du front d'onde.

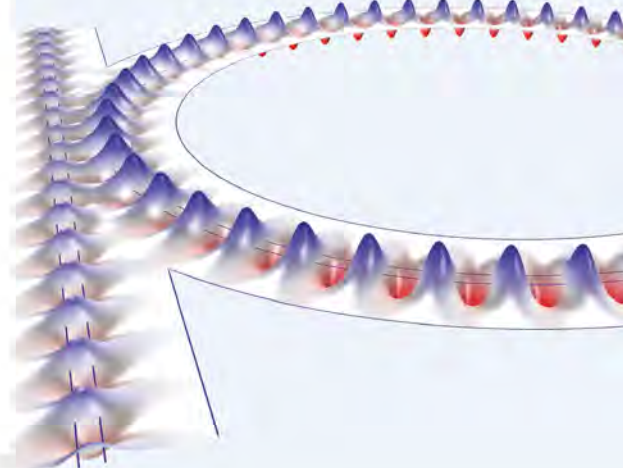
Le transfert de la lumière est assuré par les fibres optiques posées à l'extérieur à même le sol mais protégées par une protection mécanique et une enveloppe isolante. À la sortie des fibres, les lignes à retard de CHARA permettent de compenser le trajet différentiel entre la source et les télescopes. Cette longueur variant au cours de la nuit, les lignes à retard sont constituées de réflecteurs mobiles se déplaçant grâce à des chariots dont la position est programmée en ●●●

## ÉTUDE DE CAS

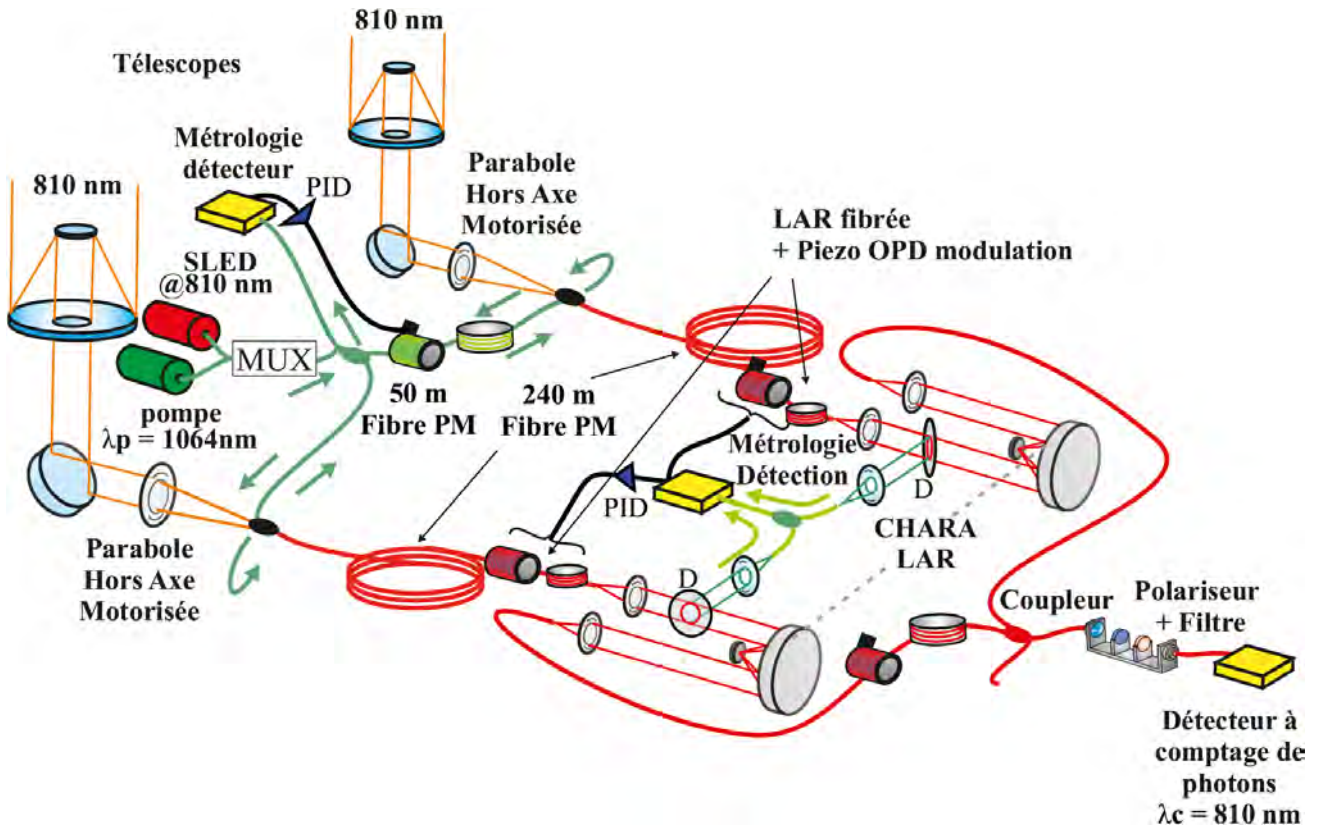
# Tout a commencé avec deux seaux d'eau...

En 1870, un scientifique du nom de John Tyndall a essayé de contrôler la lumière en utilisant deux seaux d'eau, illustrant la réflexion interne totale à un public fasciné. Aujourd'hui, les chercheurs disposent d'outils plus avancés. Lorsqu'ils fabriquent et analysent des prototypes de guides d'ondes optiques, les ingénieurs actuels utilisent des logiciels de simulation numérique pour accélérer le processus de conception.

EN SAVOIR PLUS [comsol.blog/silicon-photonics](https://comsol.blog/silicon-photonics)



Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des composants et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche.



fonction de la position de la source et des télescopes utilisés. Le mélange interférométrique est ensuite réalisé par un coupleur et une variation linéaire de chemin optique au cours du temps grâce à un modulateur fibré permet de visualiser les franges temporellement.

### UN INTERFÉROMÈTRE HECTOMÉTRIQUE EN PLEIN AIR !

La mise en œuvre d'un interféromètre ayant des bras fibrés de 240 m installés en plein air s'accompagne inévitablement de fluctuations de chemin optique induites par les variations de température, les vibrations et les contraintes mécaniques subies par les guides optiques. Une compensation en temps réel est donc nécessaire. Pour ce faire, nous avons développé des systèmes d'asservissement permettant de comparer les longueurs de chemins optiques des bras de l'interféromètre par une méthode interférométrique grâce à un laser de métrologie se propageant conjointement avec le signal astronomique. Ce laser est soit une source purement dédiée soit une pompe utilisée pour générer les effets non-linéaires présentés dans le paragraphe suivant. Toute variation du chemin induit donc une fluctuation

**Figure 1.** Schéma de principe de l'interféromètre implanté sur le réseau CHARA au Mount Wilson. La lumière de la source astronomique à 810 nm est collectée par des télescopes de 1 m de diamètre puis injectée dans des fibres optiques de 240 m de long. La lumière est ainsi acheminée vers le laboratoire de mélange où des lignes à retard compensent le chemin optique différentiel entre les télescopes. La recombinaison est assurée par un coupleur, dont la sortie est filtrée et envoyée vers un détecteur à comptage de photons. Simultanément, une source de laser de métrologie est injectée dans les deux bras de l'interféromètre pour stabiliser les trajets optiques avec une précision nanométrique.

de puissance lumineuse à la sortie de l'interféromètre permettant, après passage dans un filtre PID et un amplificateur, de générer un signal de correction actionnant des modulateurs de chemin optique implantés sur les fibres optiques. En situation réelle, sur le site du Mount Wilson, nous avons pu stabiliser l'interféromètre avec une précision de 3 nm. Une telle performance est largement suffisante pour garantir l'observation de franges dont le contraste sera quasi uniquement le fait de l'analyse de la cohérence spatiale qui constitue le fondement de cette méthode de mesure. En mars 2022 nous avons ainsi pu obtenir des franges d'interférence sur l'étoile Véga observée simultanément par les télescopes Sud1 et Sud 2 du réseau CHARA (voir Figure 2). Ce résultat constitue le point de départ d'une nouvelle

génération d'instruments géants. Les réseaux de télescopes kilométriques sont maintenant envisageables grâce à notre méthode de liaison par fibres optiques. Nous participons activement au projet de l'équipe de Georgia State University, en charge de l'instrument CHARA pour étendre leur réseau de télescopes afin de proposer à la communauté astronomique un instrument unique dont la résolution angulaire sera décuplée par rapport aux instruments développés au XX<sup>e</sup> siècle.

### ÉTENDRE NOTRE DISPOSITIF VERS LE MOYEN INFRAROUGE GRÂCE À LA CONVERSION DE FRÉQUENCES

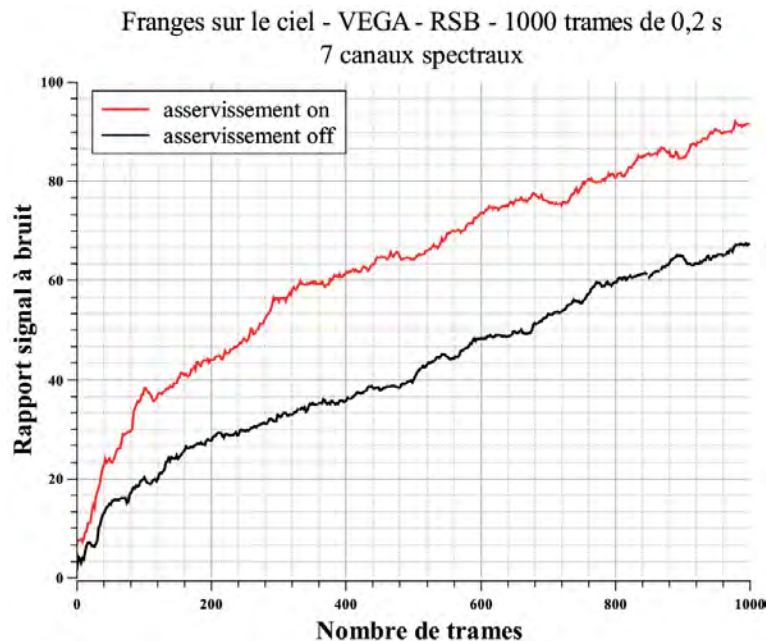
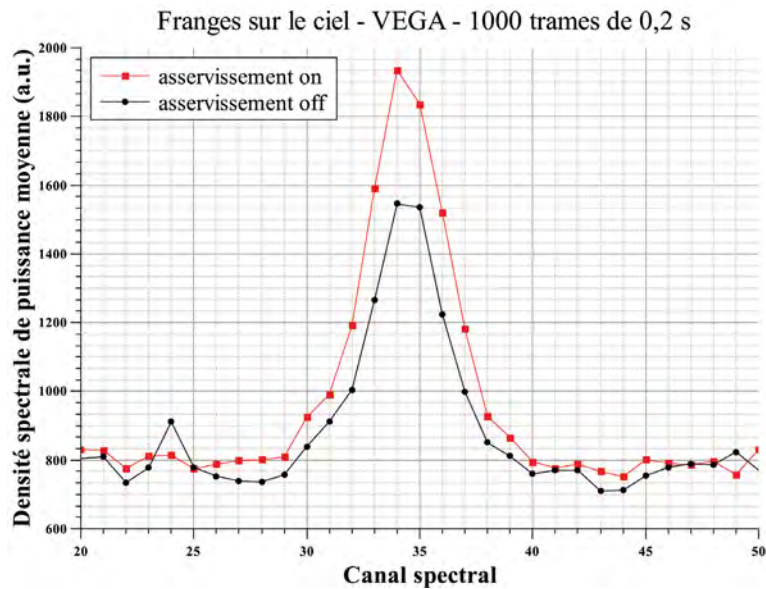
En parallèle du développement des liaisons fibrées grande distance pour les réseaux de télescopes, nous avons exploré la possibilité d'utiliser de tels

instruments dans le domaine des plus grandes longueurs d'onde. Au-delà de 2,5  $\mu\text{m}$ , deux phénomènes vont influencer sur la conception de tels interféromètres. D'une part, le rayonnement thermique ambiant commence à perturber fortement les mesures. Pour s'imaginer l'analogie en visible il faudrait chauffer l'ensemble de l'instrument au rouge et essayer d'observer une source astronomique malgré

tout. La méthode classique pour travailler au-delà de 2,5  $\mu\text{m}$  consiste donc à implanter le plus grand nombre de composants dans un cryostat. D'autre part, les fibres en silice sont fortement absorbantes au-delà de 2,5  $\mu\text{m}$ .

Ces deux raisons nous ont conduit à proposer d'adapter le rayonnement astronomique à notre instrument plutôt que de modifier les composants et utiliser ●●●

**Figure 2.** (Gauche) Pic correspondant aux franges sur le ciel par moyennage de la densité spectrale de puissance du signal interférométrique détecté en régime de comptage de photons. (Droite) Cette méthode permet d'augmenter le rapport signal sur bruit au cours du temps d'intégration.



**TOPTICA**

par **OPTON LASER**  
INTERNATIONAL

**LASERS Monofréquence CW**  
Puissance - Cohérence - Stabilité

### TOPMODE

- ▲ 405nm 50mW - 100mW TEM00
- ▲ Longueur cohérence >25m
- ▲ Largeur raie <5MHz



### TOPWAVE

- ▲ 228.5nm 10mW
- ▲ 257nm 15mW
- ▲ 266nm 150mW-300mW
- ▲ 405nm 1W
- ▲ Longueur cohérence >100m
- ▲ Largeur raie <1MHz

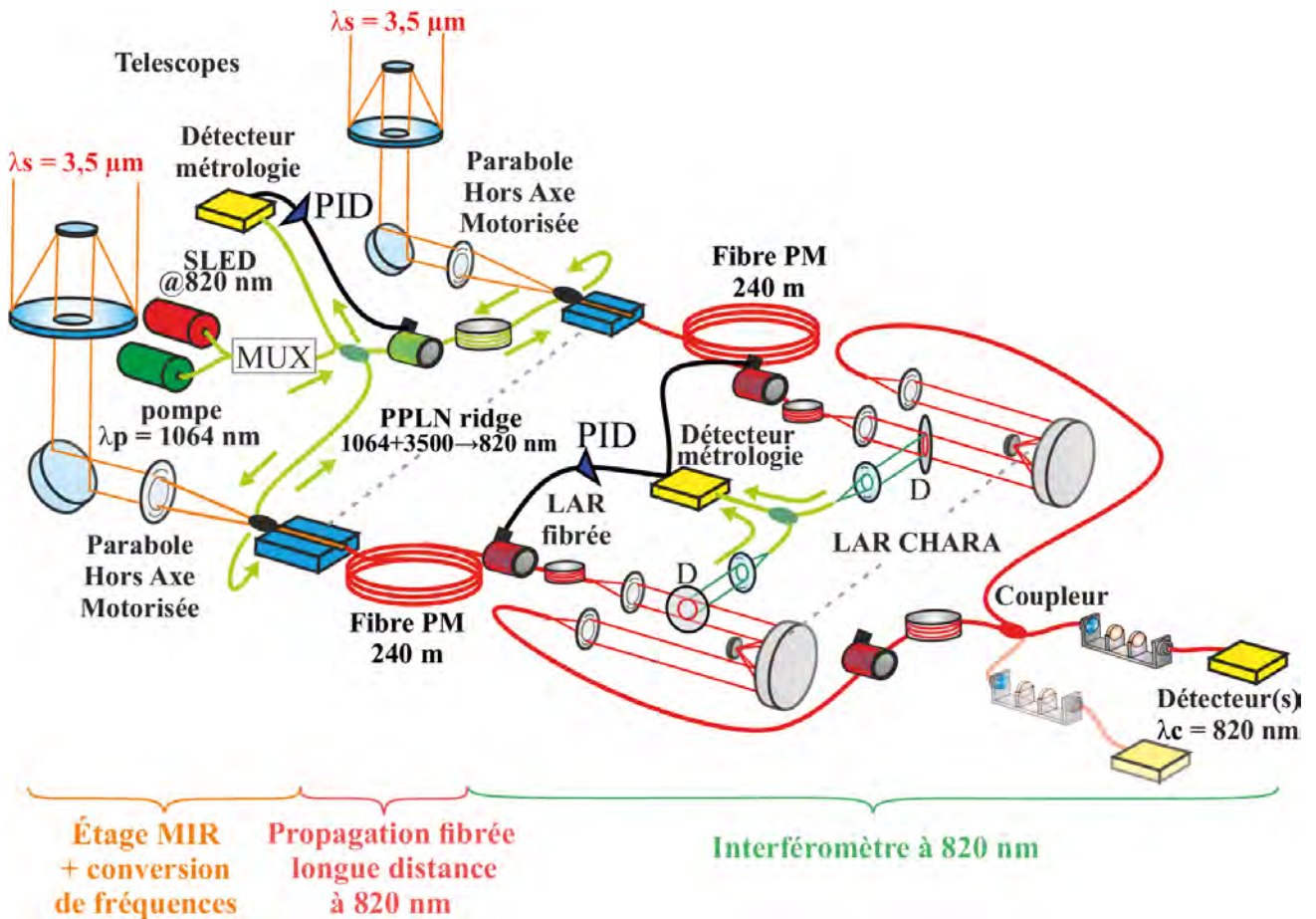


Votre contact :

Laurence.Duchard@optonlaser.com



[www.optonlaser.com](http://www.optonlaser.com)



une cryogénie. Ce dernier point est particulièrement avantageux si l'on envisage une mission spatiale où la cryogénie est très pénalisante par sa masse, ses vibrations, sa durée de vie et sa consommation énergétique.

La figure 3 présente un schéma de principe de l'instrument ALOHA que nous implantons à l'observatoire du Mount Wilson. Cette nouvelle configuration reprend tous les éléments de la figure 1 en lui adjoignant, dans chaque bras, un étage de conversion de fréquences. Le rayonnement astronomique autour de  $3,5 \mu\text{m}$  est injecté dans un guide PPLN de section  $8 \times 8 \mu\text{m}$  simultanément avec le flux d'une diode laser DFB de pompe d'une puissance de 30 mW par bras à 1064 nm afin d'obtenir la somme de fréquences autour de 820 nm [4,5].

### CONCLUSION

Nous développons actuellement l'instrument ALOHA permettant de proposer une nouvelle approche pour mettre en réseau un ensemble de télescopes dédiés à la haute résolution en astronomie. La première

**Figure 3.** Schéma de principe de l'interféromètre intégrant l'étage de conversion non-linéaire. Les champs collectés par les télescopes sont mélangés avec un faisceau de pompe dans des cristaux sommeurs de fréquences. La lumière moyen infrarouge ainsi convertie à 820 nm peut se propager dans des guides optiques jusqu'à la station de recombinaison où est effectué le mélange interférométrique.

nouveauté réside dans l'utilisation de liens fibrés hectométriques entre les télescopes et la station de mélange interférométrique. Ce dispositif unique a été testé avec succès sur le réseau de télescopes CHARA (CA USA) de l'université de Géorgie. Ce succès constitue le socle du futur projet d'extension du réseau CHARA au


Mount Wilson avec des bases kilométriques. L'utilisation de la somme de fréquences en astronomie constitue la deuxième nouveauté qui pourrait révolutionner l'astronomie moyen infrarouge, en s'affranchissant de nombreux problèmes liés au fond thermique tels que la cryogénie ou le transport des faisceaux. ●

### RÉFÉRENCES

- [1] L. Lehmann *et al.*, *Experimental Astronomy* **46** (3), 447 (2018)
- [2] P. Darré *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 233902 (2016)
- [3] J. Magri *et al.* soumis à *Experimental Astronomy*, preprint : <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2014442/v1>
- [4] L. Lehmann *et al.*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **485**, 3595 (2019)
- [5] L. Lehmann *et al.*, *Opt. Express* **27**, 19233 (2019)



New Decade  
New Logo  
Same Mission



## Driving competitiveness of the european photonics industry

EPIC is the world-leading industry association that promotes the sustainable development of organizations working in the field of photonics in Europe. We foster a vibrant photonics ecosystem by maintaining a strong network and acting as a catalyst and facilitator for technological and commercial advancement.

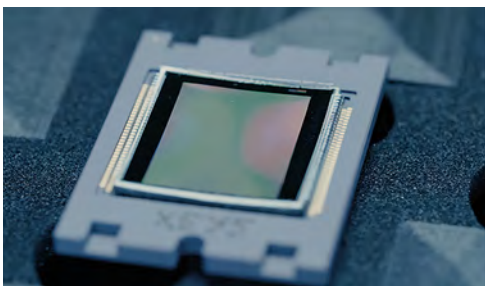
# LA COURBURE DE CAPTEURS D'IMAGE : UNE AMÉLIORATION ASTRONOMIQUE ?

**Emmanuel HUGOT<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, Aix Marseille Univ, CNRS, CNES, Marseille, France

<sup>2</sup> CURVE s.a.s., Marseille, France

\*[emmanuel.hugot@lam.fr](mailto:emmanuel.hugot@lam.fr)



<https://doi.org/10.1051/photoniq/202211736>

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.

## UNE APPROCHE BIO-INSPIRÉE

L'exemple le plus commun est bien entendu l'œil humain, système optique composé d'une lentille à focale variable – le cristallin – et d'une surface de réception des images sphériques – la rétine. Cette configuration permet à l'œil humain la captation d'un grand champ de vue avec un mécanisme de mise au point, sorte d'auto-focus naturel.

La surface focale d'un système optique n'a a priori aucune raison d'être plate. La courbure de champ dépend

Étudiée pour la première fois par la NASA au début des années 2000, l'idée de pouvoir modifier la forme des composants semi-conducteurs afin qu'ils épousent la surface focale d'un système optique a intéressé nombre d'acteurs mondiaux – Sony, Apple, Microsoft, Teledyne E2V pour ne citer que les plus importants – mais aussi français avec le CEA-LETI et le CNRS qui depuis plus de 10 ans ont permis des avancées grâce à la réalisation de prototypes de démonstration divers, jusqu'à l'utilisation récente de ces composants d'un nouveau genre pour l'instrumentation scientifique de pointe. Alors courber des capteurs d'image, oui, mais pourquoi ?

des paramètres des optiques acheminant les images. Les caméras grand champ utilisaient précédemment des plaques photo courbées afin de coller à cette courbure de champ et obtenir des images nettes à l'aide de lentilles simples. L'avènement des technologies de capteurs CCD dans les années 70 a changé la donne, et les jeux de lentilles des systèmes optiques ont dû être totalement repensés. La transition vers l'imagerie numérique a demandé plusieurs années et a dû suivre le rythme des évolutions des

capacités de production et des marchés, pour aujourd'hui aboutir à ce qui est dans toutes nos mains : les caméras ultra-compactes de smartphones produites par centaines de millions chaque année.

Libérer le paramètre de forme des surfaces focales en imagerie, c'est donc proposer de revenir à des optiques plus simples et de meilleure qualité, plus compactes et moins coûteuses, plus lumineuses et moins chromatiques. C'est élégant, mais est-ce aussi révolutionnaire qu'on le prétend ? Enquête.

### LES AVANTAGES TECHNIQUES

Courber les capteurs permet de supprimer entre un tiers et la moitié des optiques, par suppression des aplanisateurs de champ. Il en résulte un gain sur chacun des critères de performance d'un système optique : le champ de vue peut être augmenté, la qualité d'image et son homogénéité dans le champ sont améliorées, le vignetting peut être supprimé par conception. Le chromatisme, également, est fortement diminué sur les systèmes grand champ.

D'autres avantages apparaissent : réduction du volume et de la masse des systèmes optiques, réduction des potentielles erreurs d'alignement, réduction des temps d'intégration et tests, amélioration de la robustesse des systèmes.

En fournissant des images de meilleure qualité tant sur la distorsion, l'aberration chromatique ou l'illumination, les systèmes à capteur courbe ont un impact direct sur les analyses d'image en aval et sur la performance de leur interprétation. Ainsi, cette activité impacte tous les domaines de l'imagerie optique.

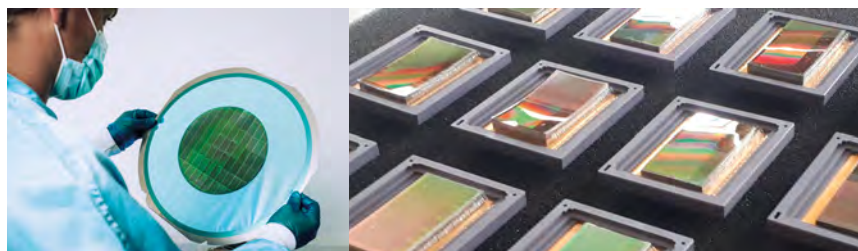
### IMPACT SOCIÉTAL ET ÉCONOMIQUE

Le bénéfice touche des domaines d'application comme l'imagerie embarquée, où le gain en masse et volume est primordial. On pourra citer l'imagerie depuis les drones pour la surveillance des cultures, où contrôler l'aberration chromatique est fondamental, puisque la réponse spectrale du système est au cœur de la détection de la maturité des champs survolés.

A l'aube du New Space, la course aux imageurs compacts et grand champ

s'intensifie. Les imageurs à capteurs courbes embarqués sur nanosatellites combinent qualité d'image, compacité, stabilité mécanique et lancement bas coût. L'Agence Spatiale Européenne (ESA) s'intéresse au sujet depuis plusieurs années, notamment à travers les études de son programme de surveillance des aurores boréales par nanosatellites pour la prévention des orages géomagnétiques depuis les pôles. Les imageurs embarqués devront viser un champ de 60 degrés dans l'Ultra-Violet. Dans ce cas, réduire le nombre d'optiques d'imagerie devient primordial pour maximiser le flux transmis.

Dans le cas de grands volumes de production, on peut citer le domaine des véhicules autonomes, des caméras de smartphone, des casques à vision nocturne et de la réalité virtuelle et augmentée. Dans le cas des véhicules autonomes, les systèmes fish-eye (180 degrés de champ) embarqués souffrent des problématiques de vignetting ainsi que de chromatisme dans les bords de champ. Dans une logique de minimisation des risques liés aux accidents potentiels des véhicules autonomes, l'amélioration de la qualité des images va permettre de réduire les incertitudes lors des analyses d'image temps réel. Dans le cas des smartphones, les enjeux s'articulent autour des imageurs grand champ, ultrafins et à fort volume de production. La courbure de capteurs permettant de réduire le nombre d'optique devient incontournable. Il en va de même pour les aspects de captation d'image pour la réalité virtuelle, où les dimensions des systèmes limitent encore leurs conditions d'utilisation.



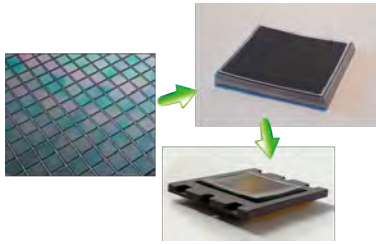
**Figure 1.** Capteurs courbes produits au Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, basés sur la technologie de capteurs HDPYX de la société Pyxalis. Ces capteurs ont servi de démonstrateurs pour la mission de surveillance des aurores polaires depuis l'espace qui doit être opérationnelle en 2027.

# YOUR PARTNER TO BUILD ULTIMATE LiDAR SYSTEMS

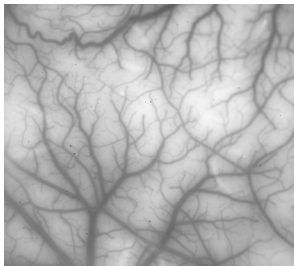
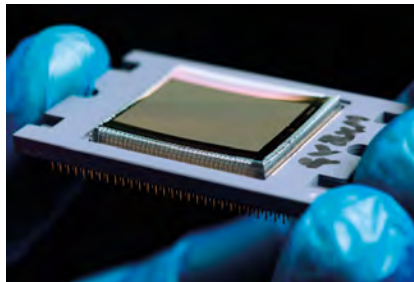
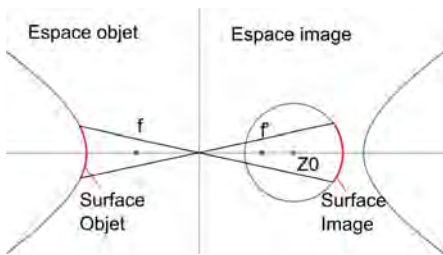


Avalanche  
Photodiodes

Discover at  
[lasercomponents.com](http://lasercomponents.com)



Après amincissement pour les rendre flexibles, les puces sont extraites de leurs wafers et assemblées sur des substrats ayant la forme voulue. L'étape finale consiste à procéder au câblage des puces courbes dans les céramiques standard, pouvant directement être utilisées avec des électroniques de lecture existantes.



**Figure 2.** Représentation de la surface objet d'un capteur courbe concave selon les lois de l'optique paraxiale. Dans le cas de l'imagerie de la surface du cerveau pour applications bio-médicales, l'Institut de Neurosciences de la Timone exploite une caméra à capteur sphérique pour le suivi de l'activité surfacique du cortex.

© C. Gaschet, C. Fresillon-CNRS photothèque, I. Racicot, Curve s.a.s.

### SYSTÈMES EXISTANTS

A ce jour, très peu de systèmes ont jugé que cette technologie puisse servir leurs intérêts. Dans le domaine de l'astronomie, on citera le télescope Kepler et le télescope « Zwicky Transient Facility », deux télescopes de Schmidt dont la surface focale est naturellement convexe. Cependant, le module focal convexe est composé d'un tuilage de capteurs plans, la technologie de courbure n'étant pas encore suffisamment développée à l'époque de leur conception et réalisation.

Aujourd'hui en cours d'installation sur le site astronomique de Calar Alto au sud de l'Espagne, le télescope CASTLE (Calar Alto Schmidt Lemaître Explorer) sera la première démonstration d'utilisation d'un capteur courbe convexe pour l'astronomie. Piloté par le Laboratoire d'Astrophysique de Marseille et l'Observatoire Astronomique de Strasbourg, il utilise une combinaison optique de Schmidt dont la courbure de champ

naturellement convexe se prête à l'utilisation d'un capteur courbe afin de se passer des lentilles d'aplanissement de champ qui dégradent la qualité optique. Le télescope sera dédié à l'observation de l'environnement des galaxies à faible brillance de surface, domaine d'observation très exigeant en termes de qualité optique. Prévu pour fin 2023, CASTLE est considéré

comme un démonstrateur technologique par les instruments du VLT et de l'ELT qui ont déjà sélectionné cette solution comme baseline.

Dans le domaine de la surveillance de l'espace depuis la terre, le département de la défense américain DARPA a déjà mis en service le Space Surveillance Telescope (SST) il y a une dizaine d'années, muni de capteurs convexes installés sur un système d'ajustement actif permettant d'assurer la continuité entre les matrices de pixels, une sorte de co-phasing en plan focal.

Domaine totalement différent, les neurosciences. L'institut de Neurosciences de la Timone (INT) s'emploie à étudier le comportement des stimuli à la surface du cerveau, ceci à l'échelle mésoscopique. On parle alors d'un besoin d'imager une surface de cerveau assez large pour être représentative. Or, la surface du cerveau est elle-même convexe. Sous la coupe du programme européen MESO CORTEX, l'INT et le Laboratoire d'Astrophysique de Marseille se sont associés en 2020 à la PME Curve s.a.s.



Le projet de télescope CASTLE (Calar Alto Schmidt Lemaître Explorer), en cours de construction au sommet de l'observatoire de Calar Alto au sud de l'Espagne, sera le premier télescope utilisant un capteur courbe pour observations astronomiques. Le concept optique, utilisant une cavité de Schmidt repliée, permet de placer le module focal en dehors du faisceau optique évitant ainsi l'obstruction centrale et les effets diffractifs des supports mécaniques. Le capteur CMOS convexe épouse la courbure naturelle de la surface focale d'un télescope de Schmidt. Cette innovation permettra d'explorer l'environnement des galaxies à faible brillance de surface.





© ESA

Septembre 1859. L'astronome Richard Carrington observe d'immenses taches à la surface du Soleil, signes d'activité intense et d'éjections de masse coronales en direction de la Terre. L'interaction avec la magnétosphère terrestre a créé un orage géomagnétique dont

l'impact fut tel que les aurores polaires se voyaient depuis les tropiques, et surtout, la communication par télégraphe s'en est retrouvée affectée durant plusieurs jours. Un tel événement aujourd'hui ferait tomber les communications mondiales et demanderait 5 à 10 années d'effort pour un retour à la normale pour un montant estimé à quelques... trillions d'euros. L'Agence spatiale européenne (ESA), à travers son département de surveillance du climat spatial, prévoit d'envoyer une flotte de nanosatellites chargés de surveiller l'activité des aurores polaires pour anticiper de tels événements. Ils imageront un champ de vue de 60×60 degrés carrés dans l'ultraviolet. Dans ce cadre l'ESA souhaite utiliser des capteurs courbes voire freeforms, afin de réduire le nombre d'optiques nécessaires et ainsi augmenter le flux récupéré par les caméras. Ces études sont aujourd'hui menées par le Centre Spatial de Liège, les PME Pyxalis et Curve, le Centre Spatial de l'Université de Grenoble et le Laboratoire d'Astrophysique de Marseille.

et à l'ONERA pour développer, réaliser et mettre en fonction un imageur dédié, muni d'un capteur concave.

### ALORS QUEL AVENIR POUR LA COURBURE ?

Un grand nombre d'études optiques ont été menées et publiées, voire brevetées pour certaines afin d'évaluer l'apport de l'utilisation de tels composants. Les quelques prototypes et systèmes développés ces dernières années ont permis de mettre en évidence la faisabilité et la performance apportée par cette technologie. Cependant, la route reste longue avant d'arriver à un produit industriel et intégré à des systèmes existants et utilisés. La première étape consiste à

développer la production de masse, ce qui sous-entend, au-delà de la courbure collective que certains industriels développent, un aspect d'automatisation, répétabilité et industrialisation qui représente un développement lourd en termes financiers dans un domaine où tout coûte extrêmement cher.

Ce développement devra être pris en main par les acteurs les plus solides, et cela demandera surtout un changement de mentalité pour imposer ces solutions comme le nouveau standard. En attendant une validation pour simplifier les systèmes d'imagerie satellitaires, la science et l'astronomie seront les premiers à explorer le champ des possibles offert par ces composants d'un nouveau genre. ●

## RÉFÉRENCES

- [1] E. Muslimov, E. Hugot, W. Jahn *et al.*, Opt. Express **25**, 13 (2017)
- [2] "CURVE-ONE courbe ses capteurs afin d'améliorer les clichés," La Recherche, 549 (2019)
- [3] "A wider-eyed watchdog of the clutter surrounding Earth," The New York Times (2016)
- [4] C. Gaschet *et al.*, Appl. Opt. **58**, 973-978 (2019)
- [5] I. Racicot *et al.*, Journal of Neural Engineering, 19 (2022)

2BLightingTechnologies  
www.2blighting.fr

## 2B Lighting Technologies s'offre un nouvel écran



Afin de fêter les 20 ans de la création de la société, 2B Lighting Technologies, entreprise de distribution de solutions de hautes performances dans le domaine de la Fibre Optique et de la Photonique, s'est engagée dans la construction d'un nouveau bâtiment pour accueillir ses équipes commerciales et techniques. Ce nouveau siège social, d'une superficie de 700m<sup>2</sup>, sera situé sur la commune de Limours (91). Tout comme l'annexe commerciale et technique située à Pessac (33), il sera partagé avec la société dB & Degrees (www.db-degrees.com), entreprise experte en conception, prototypage, modélisation et fabrication toutes séries de solutions pour la Compatibilité Électromagnétique (CEM) et la Gestion Thermique et partenaire de 2B Lighting Technologies. Ce rapprochement permettra de mutualiser certaines ressources nécessaires aux activités des 2 sociétés. La réception de ce nouvel écran est prévue sur le 2<sup>ème</sup> semestre 2023. ●

### PLUS D'INFORMATIONS :

#### 2B Lighting Technologies

Tony BARTHELEMY

tbarthelemy@2blighting.com

www.2blighting.com



dB&Degrees

Frédéric MOUTAILLER

moutailler@db-degrees.com

degrees.com

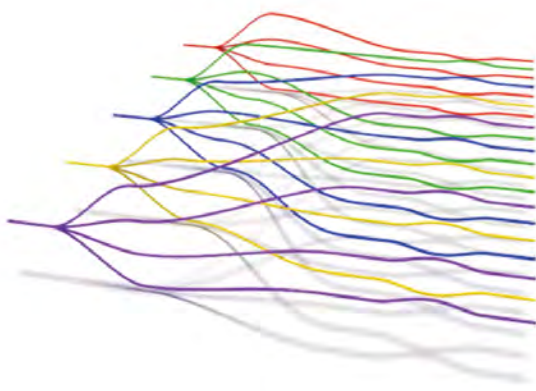
www.db-degrees.com

# 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](mailto: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/photon/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 €



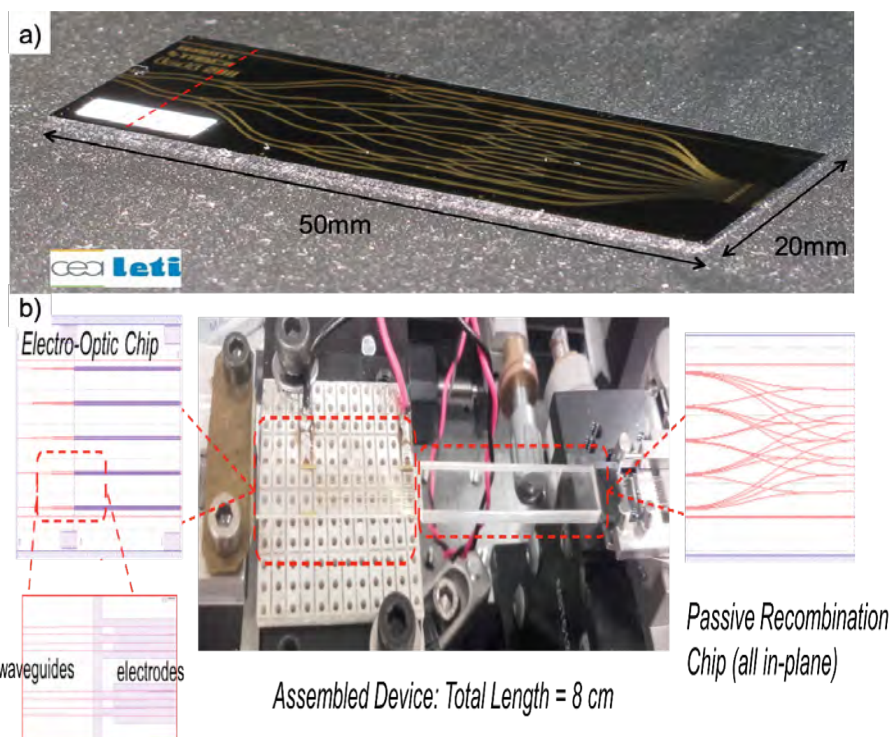
En vente sur [laboutique.edpsciences.fr](http://laboutique.edpsciences.fr)  
(section des livres en anglais)

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

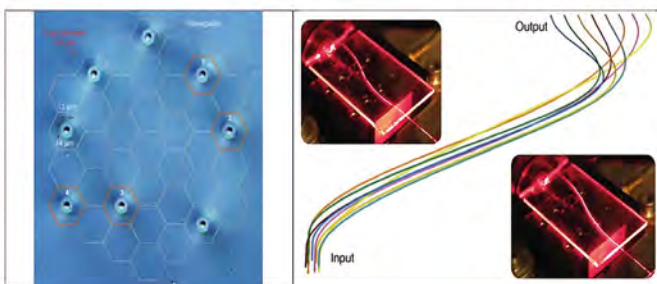
L'amélioration de la sensibilité de l'OLBI nécessite de pousser la sensibilité des puces interférométriques en améliorant la transmission intrinsèque des matériaux, le couplage de la lumière dans les guides d'ondes et la collection de la lumière en sortie. Si la transmission intrinsèque des matériaux 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

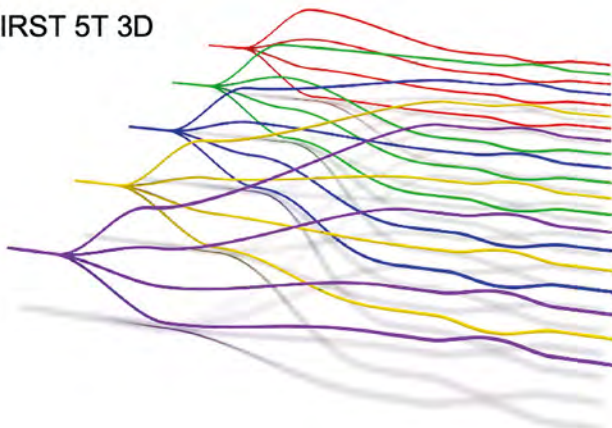
#### Vers la 3D : Permettre des conceptions multicanaux et multibandes complexes

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

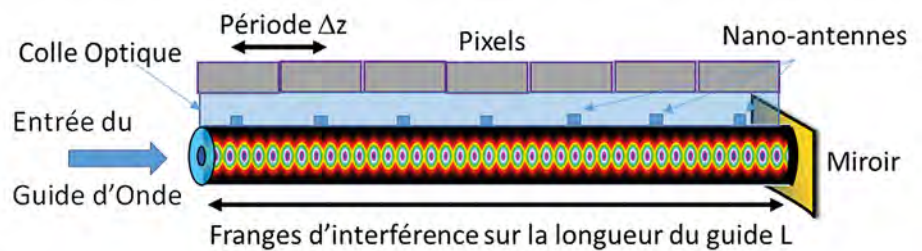


Figure 3. Concept du Spectromètre SWIFTS.

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.

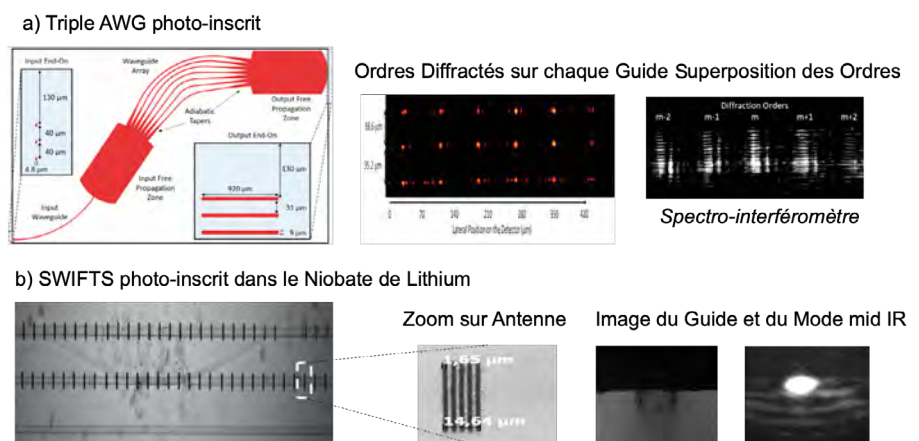
### INTÉGRATION SUR PUCE DE LA SPECTROMÉTRIE

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. 20µm), 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



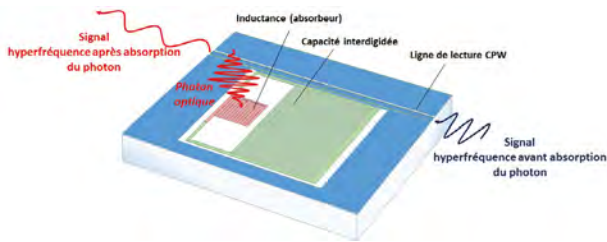
www.optonlaser.com

# MKIDs : NOUVEAUX DÉTECTEURS SUPRACONDUCTEURS ULTRASENSIBLES POUR L'ASTRONOMIE

Faouzi BOUSSAHA<sup>1,\*</sup>, Jie HU<sup>1</sup>, Jean-Marc MARTIN<sup>1</sup>, Christine CHAUMONT<sup>1</sup>, Paul NICAISE<sup>1</sup>, Piercarlo BONIFACIO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> GEPI – Observatoire de Paris, Université PSL, 77 avenue Denfert-Rochereau, 75014 Paris, France

\*faouzi.boussaha@obspm.fr



Dans cet article, nous présentons les MKIDs, pour « Microwave Kinetic Inductance Detectors », une nouvelle technologie de détecteur supraconducteur ultrasensible capable de détecter le photon et permettant de couvrir un large spectre électromagnétique allant des ondes millimétriques-submillimétriques aux rayons gamma, en passant par l'optique.

<https://doi.org/10.1051/phys/202211746>

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.

Inventé au début des années 2000, les MKIDs sont actuellement l'une des technologies de capteurs supraconducteurs les plus prometteuses, capables de répondre à de nombreuses applications en astronomie et en physique. Dans le visible et le proche infrarouge, ils présentent de nombreux avantages comparativement aux capteurs semi-conducteurs à base de CMOS et CCD. Puisqu'ils sont capables de simultanément compter les photons et de mesurer leurs énergies,

il est notamment beaucoup plus facile de construire des spectrophotomètres sans le recours aux éléments optiques tels qu'un prisme ou un réseau diffusant pour diviser la lumière, induisant une perte de photons. Or, en astronomie, particulièrement lorsqu'il s'agit de détecter des objets à ultra-faible intensité, chaque photon compte ! En termes de bruit, contrairement aux détecteurs semi-conducteurs, y compris lorsqu'ils sont refroidis, les détecteurs MKIDs ne souffrent ni de bruit de lecture ni de bruit

de courant d'obscurité. Un autre atout majeur des MKIDs concerne la grande vitesse de lecture de l'ensemble des pixels d'une matrice qui peut être réalisée en temps réel, facilitant par exemple l'observation et l'étude de phénomènes transitoires rapides tels que les sursauts gamma, les binaires à éclipse, etc. Ceci est difficilement réalisable avec les CCD et les CMOS qui sont beaucoup plus lents. Avec la même caméra, les MKIDs permettent aussi de couvrir une plus large bande de longueurs d'onde allant de 0,1  $\mu\text{m}$



jusqu'à 5  $\mu\text{m}$ , quand une caméra CCD ne peut couvrir au mieux jusqu'à environ 1  $\mu\text{m}$ .

Comme illustré sur la figure 1, un détecteur MKID est un résonateur de type LC se caractérisant par un grand facteur de qualité ( $>10^5$ ) qui se traduit par une très fine résonance. Sa fréquence est donnée par  $f_r = 1/2\pi\sqrt{(L_{geo}) + (L_{cin})C}$  où  $L_{geo}$  est l'inductance géométrique produite par l'énergie magnétique emmagasinée dans le supraconducteur et ne dépend que de sa géométrie et  $L_{cin}$  est l'inductance cinétique qui représente l'élément clé de la détection.  $L_{cin}$  se manifeste lorsqu'en présence d'un champ électromagnétique alternatif, les paires de Cooper, acquièrent une énergie cinétique, mais avec un retard dû à leur inertie. Pour rappel, une paire de Cooper est formée de 2 électrons qui au lieu de se repousser, se lient par l'intermédiaire du réseau cristallin à partir d'une certaine température appelée température critique  $T_c$ . Ceci est la base de la supraconductivité. L'inductance cinétique est donnée par  $L_{cin} = \rho\hbar/\Delta t$  où  $\rho$  est la résistivité de la couche supraconductrice,  $\Delta$  est le gap d'énergie du supraconducteur et  $t$  est l'épaisseur de la couche mince. La détection est réalisée lorsque l'inductance cinétique est modifiée par l'absorption d'un photon incident dont l'énergie est supérieure à l'énergie de liaison des électrons de paires de Cooper, donnée par  $2\Delta \approx 3,5K_B T_c$  où  $K_B$  est la constante de Boltzmann et  $T_c$  est la température critique du supraconducteur, la température critique séparant l'état normal de l'état supraconducteur. Ceci conduit à la brisure des paires de Cooper en quasiparticules. Dans ce cas, la densité des quasiparticules augmente et celle des paires diminue. L'inductance cinétique étant inversement proportionnelle à la densité des paires, la fréquence de la résonance se déplace alors vers les basses fréquences. Cet effet est accompagné par la modification de la phase et l'élargissement de la résonance qui traduit une dégradation du facteur de qualité à cause

de l'augmentation des pertes dans le circuit. En évaluant le décalage de la fréquence  $\Delta f$ , il est possible de remonter à l'énergie des photons absorbés. Le résonateur est couplé à une ligne de lecture qui a la double fonction d'exciter le résonateur grâce à l'application d'un signal hyperfréquence et de mesurer sa résonance.

Il existe principalement deux géométries permettant la définition des résonateurs LC pour faire des détecteurs MKIDs. Une géométrie qui utilise une ligne de transmission coplanaire quart d'onde ( $\lambda/4$ ) dont une extrémité est ouverte pour définir la partie capacitive et l'autre court-circuitée afin de définir la partie inductive. Le premier démonstrateur MKID réalisé en 2003 était basé sur cette géométrie. La deuxième géométrie utilise des éléments localisés où l'inductance en forme d'un méandre est parallèlement connectée avec une capacité interdigitée, comme montré sur la figure 2. Contrairement à la géométrie quart d'onde qui est difficilement applicable en dehors d'une certaine longueur d'onde, cette seconde géométrie, appelé Lumped Element KIDS (LEKIDS), convient particulièrement à l'optique. En modifiant la valeur de la capacité, il est ainsi possible de multiplexer dans le domaine fréquentiel un grand nombre de résonateurs à une seule ligne de lecture, généralement une ligne coplanaire CPW de 50  $\Omega$ , permettant la mise en œuvre de caméras comportant plusieurs milliers de pixel. Les valeurs des capacités et de l'inductance cinétique doivent être judicieusement choisies afin de maintenir des fréquences de résonance suffisamment basses, typiquement de quelques GHz, facilement mesurables avec une électronique de lecture peu coûteuse et aisée à mettre en œuvre.

Les premières caméras MKIDs optiques ont été développées et déployées sur des télescopes par l'Université de Californie à partir de 2013. L'instrument ARCONS [2] utilisant une caméra de 2024 pixels, fut le premier démonstrateur qui a été déployé avec succès sur le télescope Palomar ●●●

# OPTICAL INSTRUMENTS

## NEW & REFURBISHED



OSA  
OTDR  
Attenuators  
Source | Amplifier  
Fiber fusion splicer  
BERT (NRZ, PAM4...)  
Power meter  
DSO | DSA  
Controller

And much more ...



## FOR MORE INFORMATION CONTACT US

+33 2 96 48 20 02  
commercial@fc-equipments.com

www.fc-equipments.com



FC EQUIPMENTS  
12, rue Thomas Edison  
22 300 LANNION  
FRANCE

de 5 m en 2011. ARCONS a démontré une résolution de  $R=10$  à 400 nm et fonctionnait dans la bande 400-1100 nm. Dans l'objectif d'augmenter le nombre de pixels et d'améliorer les performances intrinsèques des détecteurs, plusieurs versions de caméras ont par la suite vu le jour. Il y a eu l'instrument DARKNESS [3] en 2016 qui, en termes de conception, est presque une réplique exacte d'ARCONS mais comptabilisant un plus grand nombre de pixels (10 000 pixels), puis l'instrument MEC [3] qui à partir du télescope SUBARU à Hawaii, a pour objectif de réaliser l'imagerie directe des exoplanètes dans la bande 800-1400 nm avec une résolution spectrale de  $R=15$ , en utilisant une caméra MKIDs de 20 000 pixels.

À l'Observatoire de Paris, nous développons SPIAKID (Spectro Photometric Imaging in Astronomy with Kinetic Inductance Detectors), un nouvel instrument dédié à l'observation et l'étude des galaxies naines à très faible intensité appelées UDFs pour Ultra-Faint Dwarfs, dans le Groupe Local. Dans ces systèmes âgés de plus de 10 milliards d'années, les étoiles sont la population dominante et la fraction d'étoiles extrêmement pauvres en métaux, donc très anciennes, est beaucoup plus élevée que dans

les galaxies naines classiques qui sont plus lumineuses. Les étoiles constituant les galaxies seraient nées entre 1 et 3 milliards d'années après le Big Bang. Pour étudier ces galaxies et établir leurs natures ainsi que leurs populations stellaires, nous avons besoin d'une photométrie ainsi que d'une spectroscopie des étoiles dans une large bande spectrale. Comme mentionné plus haut, les MKIDs sont capables d'effectuer une spectrophotométrie sans le recours à des éléments optiques. Le spectro-photo-imageur SPIAKID couvrira une large bande allant de 400 à 1600 nm et utilisera à terme une mosaïque de 4 matrices de 20 000 MKIDs chacune.

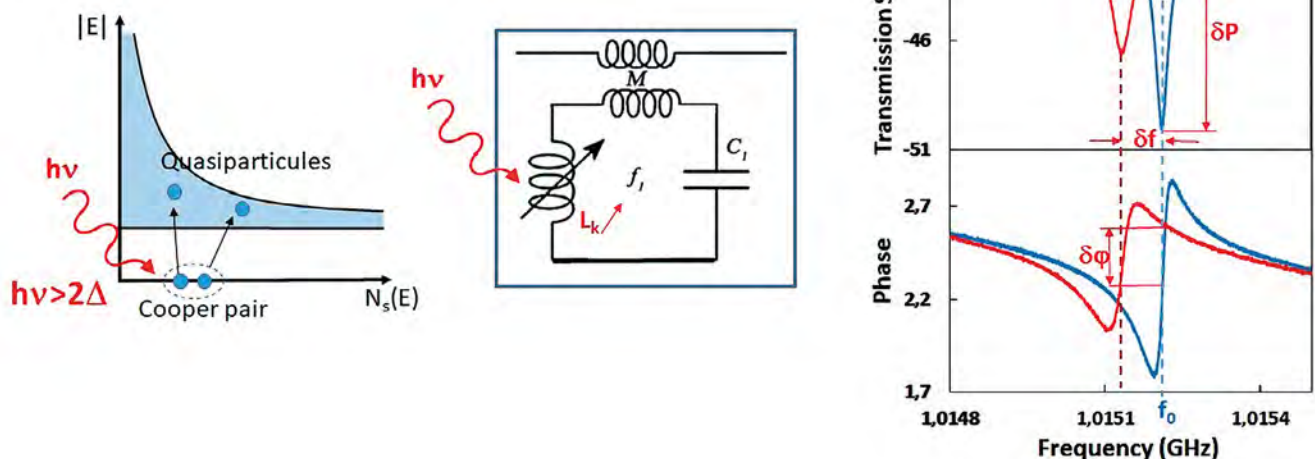
#### DÉVELOPPEMENT DES DÉTECTEURS MKIDS OPTIQUES À L'OBSERVATOIRE DE PARIS

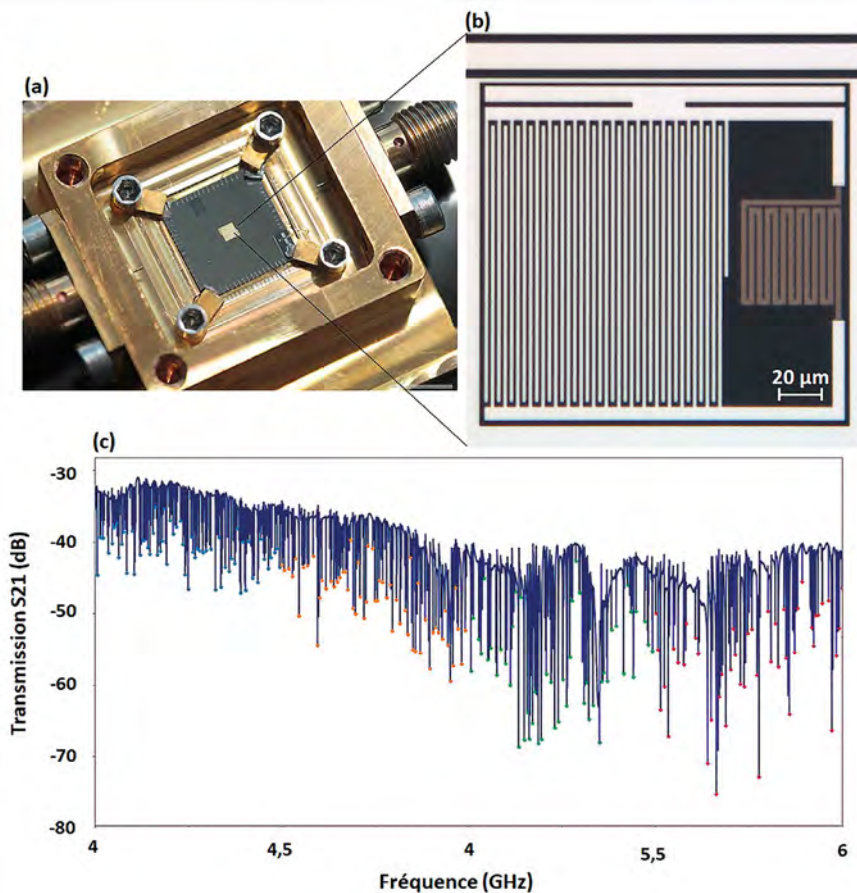
La figure 2 montre la photo d'un des LEKIDs en cours de développement à l'Observatoire de Paris. Le résonateur ainsi que la ligne de lecture sont réalisés à partir de couches minces supraconductrices dont la

mise en œuvre constitue, actuellement, à lui seul un axe de recherche important pour atteindre les performances ultimes particulièrement dans l'optique et le proche infrarouge. Le méandre inductif de  $40 \times 40 \mu\text{m}^2$  est réalisé à partir d'une couche mince en nitrure de titane (TiN) de quelques dizaines de nm, généralement entre 20 et 60 nm, d'épaisseur. Le TiN est obtenu par nitruration du Ti pendant le dépôt par la technique de pulvérisation cathodique.

Quant à la ligne de lecture, elle est généralement définie à partir d'une couche de niobium (Nb) d'une centaine de nm d'épaisseur. Contrairement à l'aluminium ( $T_c = 1.2\text{K}$ ), le supraconducteur le plus largement employé dans le millimétrique-submillimétrique, le TiN présente, d'une part, une inductance cinétique élevée facilitant la définition de résonateur de faible taille de quelques dizaines de  $\mu\text{m}$  de côté, résonant à des fréquences ne dépassant pas les quelques GHz, et d'autre part, une impédance de surface aussi élevée facilitant le

**Figure 1.** Un photon incident, lorsqu'il est absorbé par la couche mince supraconductrice (a), brise les paires de Cooper et modifie son inductance de surface, induisant par conséquent la modification de la fréquence propre  $\delta f$  et de la phase  $\delta\phi$  du résonateur LC.





**Figure 2.** (a) Image prise au microscope optique de la matrice LEKIDs de 1000 pixels. (b) Image d'un MKID isolé, optimisé pour résonner à  $f_0 = 4$  GHz. (c) Paramètre de transmission  $S_{21}$  de la ligne de lecture CPW montrant la présence d'environ 900 résonances sur 1000 attendues, mesurées à 50 mK avec un signal hyperfréquence appliqué à la ligne avec une puissance de  $P_f = -100$  dBm (0.1 pW).

couplage de l'absorbeur à l'onde incidente évoluant dans l'espace libre. Le Nb, qui présente de très faibles pertes RF, est idéal pour réaliser la piste centrale ainsi que les plans de masse de la ligne CPW.

La figure 2-b montre l'image d'un MKID de  $136 \times 132 \mu\text{m}$  appartenant à une matrice qui en comporte 1000. Ces derniers ont été optimisés pour résonner dans la bande fréquentielle 4-6 GHz. La température critique du TiN, qui peut varier entre 0.4 et 4.6 K en fonction de la quantité d'azote réagissant avec le titane pendant le dépôt, a été optimisée à environ 1 K afin d'augmenter la sensibilité des détecteurs (la sensibilité des MKIDs étant

inversement proportionnelle à la  $T_c$ ). Sachant que les MKIDs commencent à fonctionner de manière optimale lorsqu'ils sont refroidis à  $T < T_c/10$ , la matrice a été refroidie à 50 mK dans un cryostat de type ADR (Adiabatic Demagnetization Refrigerator). Les résonances sont excitées puis mesurées à travers la ligne CPW à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel. La caractérisation consiste d'abord à mesurer la transmission directe  $S_{21}(f)$  afin d'identifier les résonances puis de vérifier leurs facteurs de qualité. Le paramètre de transmission  $S_{21}$  indique qu'environ 90% des résonances ont été observées dans la bande passante optimisée exhibant des facteurs de qualité ●●●

## Tailored solutions for high-precision fibered interferometry

From basic components (deep blue to 2.0 μm)



- Delay fiber coils
- Phase shifter
- OD L

Through smart integrations



- Stabilized MZI
- Passivated assemblies
- Accurate phase control loops

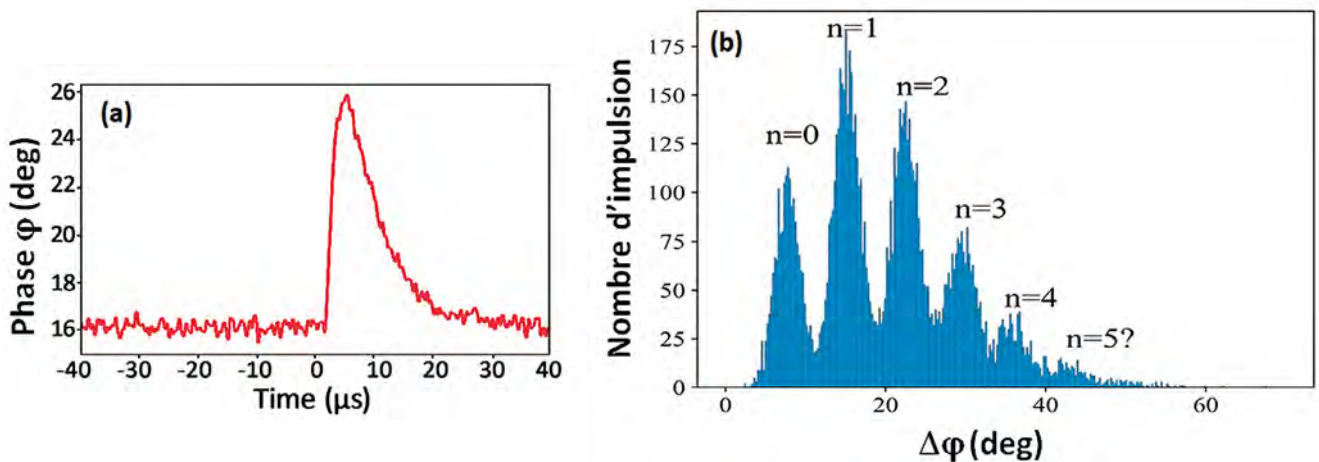
To high-end heterodyne systems for high-speed velocimetry purpose



- Contact-us for a demonstration!

**IDIL**  
FIBRES OPTIQUES

www.idil.fr



**Figure 3.** (a) Réponse temporelle de la phase du détecteur, après éclairage, permettant d'estimer le temps de vie des quasiparticules. (b) Réponses du MKID à un train d'impulsions courtes de très faibles intensités permettant de mettre en évidence le régime comptage de photons.

intrinsèques  $> 10^4$ . Afin de démontrer que les MKIDs sont capables de non seulement détecter les photons optiques mais de les compter aussi, la matrice est ensuite éclairée à  $\lambda=405$  nm avec une LED à travers une fibre optique dont la sortie est positionnée à 35 mm au-dessus des détecteurs. La figure 3-a présente la réponse du MKID dans le domaine temporel lorsqu'il est éclairé avec une impulsion de 100 ns. Cette mesure permet d'estimer le temps de vie des quasiparticules  $\tau_{qp}$  qui traduit le temps moyen nécessaire aux quasiparticules de se recombinaison de nouveau en paires de Cooper après absorption de photons. Il s'agit d'un paramètre important qui, d'une part, influe sur la sensibilité du détecteur à travers le bruit de génération/recombinaison et, d'autre part, détermine la dynamique de détection du détecteur. En effet, afin d'augmenter la sensibilité (en diminuant le bruit de génération/recombinaison), un  $\tau_{qp}$  élevé est donc préconisé. Cependant, il doit être suffisamment faible pour qu'après la détection d'un premier flux de photons, le détecteur revienne suffisamment vite à son état d'équilibre pour qu'il puisse détecter un nouveau flux.  $\tau_{qp}$  est estimé ici à environ 13  $\mu$ s. En fonction de la température critique du TiN, ce temps peut augmenter jusqu'à une centaine de  $\mu$ s. La figure 3-b montre la statistique d'impulsions en fonction de changement de phase suite

à l'absorption d'un ou de plusieurs photons, obtenue lorsque le MKID est éclairé de manière répétitive toutes les 4 ms avec une impulsion de 50 ns, dont l'amplitude est fortement atténuée. Nous constatons clairement l'absorption d'un ( $n=1$ ), de deux ( $n=2$ ), trois ( $n=3$ ) photons, etc. Le  $n=0$  n'est pas généré par l'absorption de photons mais par le bruit environnant le MKID auquel il peut être sensible. Davantage de détails sur cette étude peuvent être trouvés dans [5].

### CONCLUSION

Les détecteurs MKIDs offrent une technologie très prometteuse pour de nombreux applications

astronomiques. A l'Observatoire de Paris, nous avons développé avec succès les premiers détecteurs à inductance cinétique MKIDs optiques capables de détecter individuellement quelques photons. Etant relativement jeune, cette technologie continue néanmoins à faire l'objet d'importants efforts de recherche et développement tant au niveau national qu'international afin de répondre aux exigences très pointues des applications astronomiques. Plusieurs caractéristiques doivent en effet être investiguées et améliorées. C'est le cas, par exemple, de la résolution en énergie ainsi que de l'efficacité quantique qui est de l'ordre de 10-15%. ●

### RÉFÉRENCES

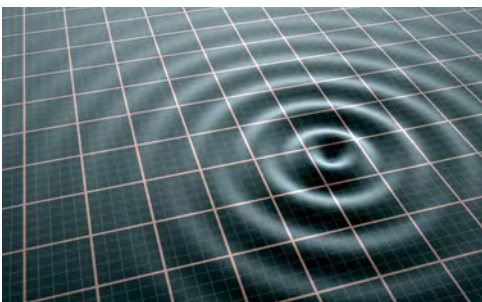
- [1] P. K. Day *et al.*, *Nature* **425**, 817(2003)
- [2] B. A. Mazin *et al.*, *Astronomical Soc. Pacific* **125**, 1348 (2013)
- [3] S. R. Meeker *et al.*, *Astronomical Soc. Pacific*. **130**, 065001 (2018)
- [4] A. Walker *et al.*, *Proceedings 10702, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VII*; 107020V (2018)
- [5] J. Hu *et al.*, *Phonon Induced Response in Microwave Kinetic Inductance Detector Under Optical Illumination*, soumis (2022)

# ACHETER UN ANALYSEUR DE FRONT D'ONDE

**Benoit WATELLIER**

PHASICS, Bâtiment Explorer, Parc Technologique de Saint Aubin, 91190 Saint Aubin

\*bw@phasics.fr



**Les analyseurs de front d'onde permettent de mesurer l'intensité et la phase de la lumière. Ce sont des instruments de mesure très flexibles qui trouvent leur place autant dans les laboratoires de recherche que dans les chaînes de contrôle de fabrication des optiques. Ils y ouvrent de nouveaux horizons pour des applications sans cesse renouvelées.**

<https://doi.org/10.1051/photon/202211751>

**U**n analyseur de front d'onde est en principe un instrument permettant de mesurer la phase d'un faisceau

lumineux. En réalité, au vu des évolutions techniques, cette définition est restrictive car la plupart des solutions actuelles permettent de mesurer le champ électromagnétique

complexe de la lumière et pas seulement sa phase. Cela signifie qu'il mesure l'intensité, comme une caméra standard, tout autant que la phase de la lumière. Sa ●●●

## SPECTROGON

State of the art products

### Filtres Interférentiels

De 200 à 15000 nm

- Passe-bande
- Passe-haut
- Passe-bas
- Large bande
- Densité neutre
- Disponible en stock

### Réseaux Holographiques

De 150 à 2000 nm

- Compression d'impulsion
- Télécom
- Accordabilité spectrale
- Monochromateurs
- Spectroscopie
- Disponible en stock

UK (parle français): sales.uk@spectrogon.com • Tel +44 1592770000  
 Sweden (headquarters): sales.se@spectrogon.com • Tel +46 86382800  
 US: sales.us@spectrogon.com • Tel +1 9733311191

www.spectrogon.com

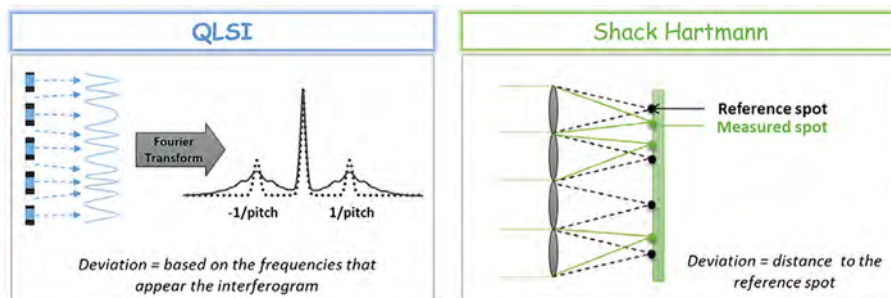


Figure 1. Schéma de principe des deux technologies QLSI et Shack Hartmann.

particularité par rapport aux interféromètres abondamment utilisés pour mesurer des effets de phase, est une mesure directe du champ alors que ceux-ci ne sont capables que de mesurer une différence de phase par rapport à une référence. De ce fait, les analyseurs de front d'onde sont dits auto-référencés, ce qui signifie qu'ils n'ont pas besoin d'une référence externe pour fonctionner. Comme ils n'ont pas besoin d'une source interne, un appareil fonctionne sur une gamme de longueur d'onde étendue. Ce sont des systèmes dont la taille est proche de celle d'une caméra. Ils sont donc facilement intégrables dans des expériences ou des systèmes de métrologie très encombrés (spatial) ou pour mesurer des objets de très petite taille. De par leur compacité, ils sont aussi très peu sensibles aux vibrations ce qui permet le déploiement de la métrologie optique de précision dans des environnements industriels habituellement interdits à l'optique. On voit donc que la force des analyseurs de front d'onde réside dans leur flexibilité.

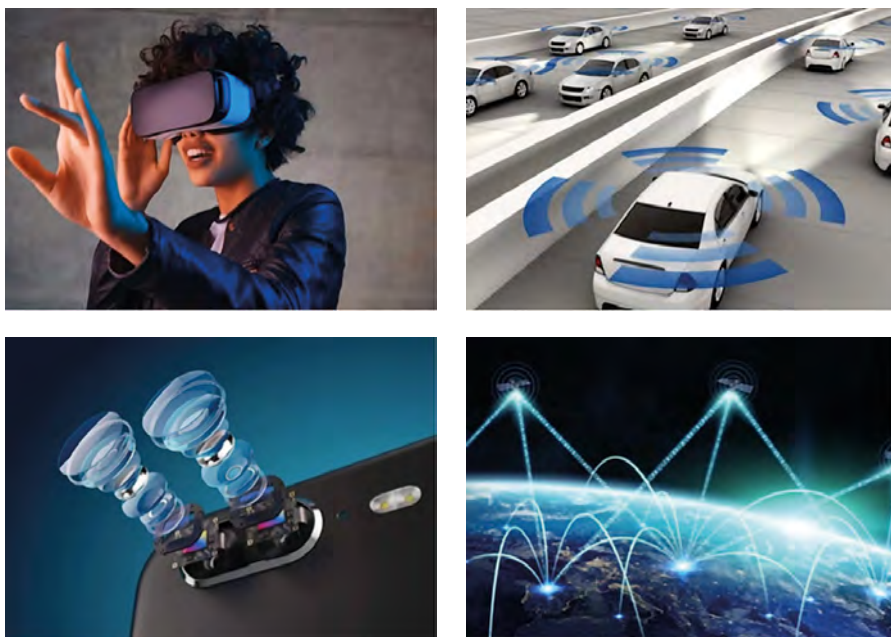
**TYPES D'ANALYSEURS**

Il existe un grand nombre de techniques d'analyse de front d'onde. Comme la phase ne peut pas être mesurée directement en raison de l'ordre de grandeur des retards de phase de quelques femtosecondes, elle est révélée en observant ses effets lors de la propagation. Certaines techniques vont chercher à déduire le champ électromagnétique à partir de plusieurs mesures d'intensité dans plusieurs plans le

long de la propagation. Comme l'équation à résoudre est non-linéaire, le problème mathématique est complexe à résoudre et le résultat sensible au bruit. En faisant des approximations, le problème peut être linéarisé au prix d'une réduction de la dynamique de mesure. Certaines techniques cherchent à créer une référence avec le faisceau lui-même (radial shearing, SLIM) en dédoublant le faisceau, filtrant une partie et la faisant interférer avec l'autre. On obtient la phase directement, souvent au prix d'un

filtrage spatial sur les images obtenues (halos). De plus, l'utilisation d'un filtrage spatial rend l'instrument très sensible à l'alignement et son intégration parfois complexe. Enfin, on peut se baser sur le fait que les surfaces équiphasées (i.e. les fronts d'onde) sont perpendiculaires au vecteur d'onde local, c'est-à-dire la direction locale de propagation : le vecteur d'onde est égal à l'opposé du gradient de la phase. Ainsi, si la lumière passe à travers une grille périodique, la projection de cette grille dans un plan distant de quelques millimètres sera une grille déformée dont la déformation est proportionnelle aux dérivées de la phase. Ce principe est utilisé dans le test de Hartmann et de Shack-Hartmann. Pour le premier, on utilise une grille de trous dont l'espacement est connu. Dans le second, la figure périodique est générée par une matrice régulière de micro-lentilles dont l'intérêt principal est de concentrer la lumière sur le capteur de l'instrument. A la fin des années 1990, Jérôme Primot de l'ONERA a repensé la grille de

Figure 2. Domaines d'applications de l'imagerie de phase. Réalité Virtuelle/Réalité Augmentée, Système avancé d'aide à la conduite ADAS, Smartphone, Communications optiques en espace libre.



Hartmann comme une modulation périodique de l'intensité, qui peut donc être modélisée comme une optique diffractive. A partir de ce constat, il a revu la méthode d'analyse du signal enregistré sur la caméra de l'instrument en utilisant des techniques basées sur l'analyse de Fourier, bien adaptée à la déformation de fonctions périodiques. Il a surtout déterminé une grille optimale pour faire de l'analyse de surface d'onde qui a une transmittance sinusoidale. Il a enfin conçu son approximation industriellement réalisable : le masque de Hartmann modifié. Cela a conduit à l'introduction de l'interférométrie à décalage quadrilatéral (QLSI, pour Quadriwave Lateral Shearing Interferometry). Dans les années 2000, il a montré que les techniques de Hartmann, Shack-Hartmann et du QLSI sont toutes les trois basées sur le même principe, qui est l'interférométrie à décalage multi-latéral (MLSI, multi-lateral shearing interferometry) qui comprend toutes les techniques déduisant la phase à partir de la déformation d'une grille régulière. Les instruments basés sur ces techniques comportent un élément modulateur d'intensité et une caméra placée à quelques millimètres de celui-ci. Leur utilisation est simple car ce sont des systèmes compacts et rigides mécaniquement, ce qui fait qu'ils peuvent être utilisés un peu partout. Le savoir-faire des fabricants de tels instruments réside en grande partie dans les capacités d'assemblage robuste et d'étalonnage de l'instrument. De nos jours, l'immense majorité des analyseurs de front d'onde disponibles commercialement sont basés sur ces techniques de modulation d'intensité que sont le Shack-Hartmann ou le QLSI.

### PARAMÈTRES DE CHOIX

Les analyseurs de front d'onde sont des instruments de métrologie. Ainsi les performances les plus importantes sont les performances métrologiques sur la mesure de la phase. Celles-ci sont :

- **sa résolution en phase** : le bruit instrumental. Il est souvent de l'ordre de quelques nanomètres.

- **sa justesse** : le biais de mesure. Elle est souvent de l'ordre de la dizaine de nanomètres et dépend de la qualité de la référence utilisée pour étalonner l'instrument. La plupart des systèmes commerciaux permettent à l'utilisateur de ré-étalonner lui-même son appareil, notamment pour tenir compte d'un défaut connu de son expérience.

- **sa dynamique** : amplitude de la phase pour laquelle la résolution et la justesse sont maintenues. Elle est souvent de plusieurs centaines de microns. Il est à noter que pour ces dynamiques, la justesse de mesurage est limitée par la méthode de mesure et d'alignement car la phase varie alors très rapidement au cours de la propagation.

Le nombre de points de mesure est aussi important car s'il est grand, on pourra voir des défauts locaux et utiliser l'analyseur de front d'onde comme une caméra de phase et ainsi faire de l'imagerie de phase quantitative. Un grand nombre de points permet également une grande flexibilité sur la taille des faisceaux ou des objets observés. La taille du capteur peut être déterminante si l'on veut mesurer sans intermédiaire des faisceaux de tailles importantes. Cependant, la taille est bien souvent limitée par la taille des capteurs des caméras, qui dépassent rarement 15 mm à des prix raisonnables. Une alternative moins coûteuse est l'adjonction d'un réducteur/agrandisseur de faisceau, souvent proposé comme accessoire standard par les fabricants d'analyseurs de surface d'onde.

La vitesse d'acquisition de la caméra de l'analyseur est importante si l'on veut étudier des phénomènes rapides. Pour les phénomènes ultracourts comme les impulsions lasers nanosecondes ou plus courtes, il faut vérifier avec le constructeur que les caméras fonctionnent en mode « Global Shutter » et pas « Rolling Shutter ». Dans ce mode, tous les pixels sont exposés en même temps alors que dans le mode « Rolling Shutter », souvent utilisé pour les caméras CMOS, ils sont exposés ligne par ligne.



## De 0.9 à 14 μm, l'analyse de front d'onde infrarouge haute résolution

Les technologies en infrarouge sont aujourd'hui omniprésentes dans de nombreux domaines, et leur essor est poussé par de nouvelles applications de la vie quotidienne, par les besoins industriels ainsi que par la recherche fondamentale :

- **les télécommunications en espace libre** reposent sur des faisceaux à 1.55 μm parfaitement collimatés ;
- **les véhicules autonomes / ADAS**, dont la sécurité est garantie par la précision des caméras et LiDAR fonctionnant dans l'infrarouge ;
- **la défense et l'aérospatial**, qui exploitent de nombreuses bandes du proche (900 nm) au lointain (14μm) infrarouge ;



PHASICS confirme sa position de leader des solutions de métrologie infrarouge en proposant la gamme la plus complète d'analyseurs de front d'onde, couvrant toute la gamme de 0.9 à 14 μm. Les SID4-SWIR et SWIR-HR, sont les analyseurs les plus sensibles et les plus précis dans le proche IR (0.9-1.7 μm). Le SID4-SWIR-HR propose la plus haute résolution spatiale du marché grâce à ses 160 × 128 pixels de phase.

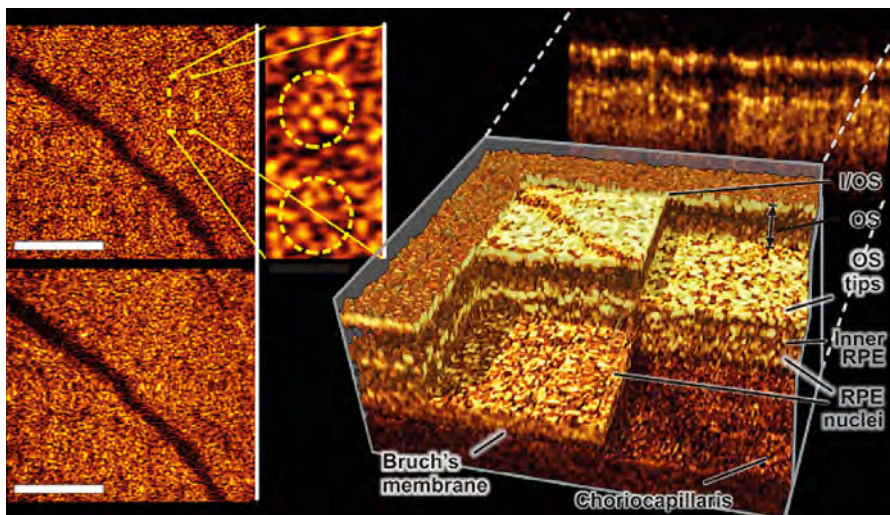
Le SID4-DWIR couvre les bandes moyen IR (3-5 μm) et lointain IR (8-14 μm) avec une très haute résolution spatiale de 160 × 120 points, permettant une caractérisation fine des lasers CO<sub>2</sub>, corps noirs, et optiques en infrarouge. ●

### PHASICS

Tel: +33 (0) 1 80 75 06 33

contact@phasics.com

[www.phasics.com](http://www.phasics.com)



**Figure 3.** Amélioration des images microscopiques (©Imagine Optic)

Lorsqu'on veut utiliser un analyseur de surface d'onde pour aligner une expérience ou un système optique, il est important que la mesure se fasse en temps réel, c'est-à-dire dans l'idéal à mieux que 20 images par seconde. Dans la pratique, 10 images par seconde sont compatibles avec le temps de réaction d'un être humain opticien. Or, le recouvrement du champ électromagnétique à partir des images enregistrées par la caméra est souvent le fruit d'un calcul complexe, surtout si le fabricant prend soin de mettre des systèmes de détection et de correction des erreurs de mesure. Il est donc important de vérifier que l'instrument proposé donne les images à la résolution spatiale indiquée avec une fréquence temporelle suffisante pour une utilisation en temps réel.

**APPLICATIONS**

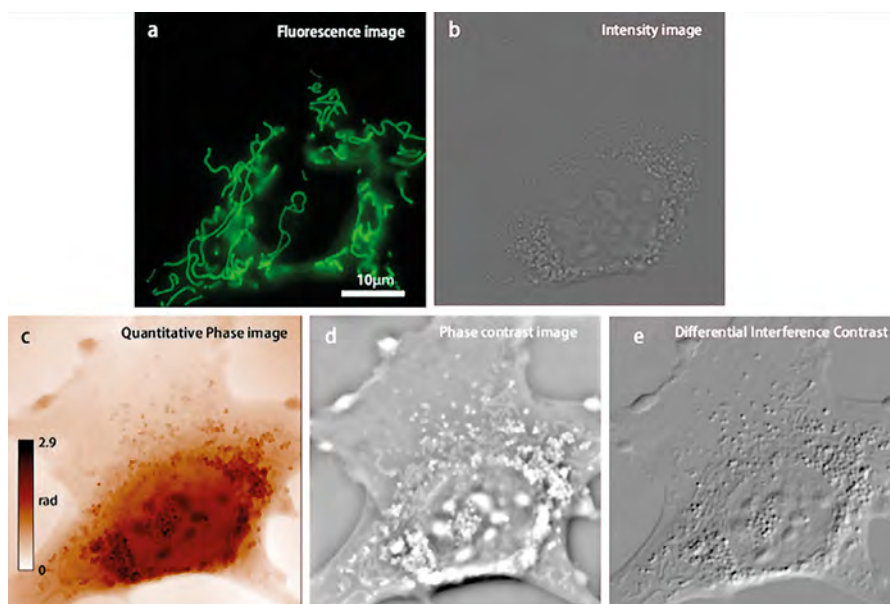
Ce qui fait le succès actuel des analyseurs de surface d'onde est la multiplicité des domaines pour lesquels ils peuvent être appliqués, du fait de leur grande flexibilité en termes d'intégration et de source lumineuse. Ils étaient utilisés dans les années 1990 uniquement dans le domaine de la métrologie optique. Puis ils sont devenus indispensables pour la métrologie des lasers et l'optique adaptative, qui a permis d'en augmenter l'intensité sur cible. A

partir des années 2000, de nouvelles applications sont apparues dans le domaine de l'imagerie pour la biologie et les matériaux. Dans certains cas, ce sont des alternatives à l'interférométrie et ils remplacent des Mach-Zender ou des Michelson. Parfois, ils permettent des mesures jusqu'alors impossibles.

**DOMAINES D'APPLICATION**  
**Métrologie optique (double et simple passage, multi-longueur d'onde) ; MTF ; EFL etc...**

L'application historique de l'analyse de surface d'onde est la métrologie des optiques. C'est pour caractériser des miroirs de télescopes que Hartmann a inventé la technique qui porte son nom et qui a été améliorée par Shack plus tard. Le principe de mesure est souvent le même. Une source de lumière étalonnée traverse un échantillon à caractériser et on observe l'effet de cet échantillon sur le front d'onde transmis. On en déduit l'erreur de front d'onde du système optique (WFE, pour Wave Front Error ou TWE, Transmitted Wave Front Error). Celui-ci est souvent spécifié en WFE et la mesure sert à vérifier sa conformité. Mais on peut aussi l'interpréter pour rétroagir sur l'alignement du système, en projetant la carte de phase sur les polynômes de Zernike. Par exemple, la présence de coma est souvent le signe du décentrement

**Figure 4.** Cellules vivantes (fibroblastes d'embryons de souris) observées en (a) fluorescence (marquage des mitochondries), (b) fond clair, (c) phase quantitative, (d) contraste de phase (simulé d'après (c)), et (e) Nomarski-DIC (simulé d'après (c)). Images reproduites avec la permission de ACS P. Bon, L. Cognet, ACS Photonics 9,2538 (2022).





d'un des composants du système. L'intérêt de l'analyseur de front d'onde est ici sa flexibilité d'alignement. Ces mesures peuvent se faire en double-passage en suivant un protocole similaire à celui utilisé avec un interféromètre de Fizeau. L'intérêt de l'analyseur de front d'onde est ici qu'il est facile d'adapter la longueur d'onde de mesure au système caractérisé, alors qu'il faut reconstruire complètement un interféromètre quand on change de longueur d'onde. L'analyseur de front d'onde a aussi comme avantage de pouvoir mesurer des fronts d'onde de dynamique de plusieurs dizaines de microns, voire plusieurs centaines de microns. Ainsi la mesure d'optiques asphériques est rendue possible sans hologramme de compensation (CGH, Computer Generated Holograms). Là où l'analyse de surface d'onde prend tout son intérêt, c'est dans la mesure en transmission et en simple passage de systèmes optiques. Celle-ci est quasiment impossible à réaliser avec un interféromètre. Elle garantit une justesse de mesure meilleure car aucun élément optique n'est inséré entre l'objet d'analyse et l'instrument.

Les analyseurs de surface d'onde sont ainsi déclinés sous forme d'instruments seuls. Des accessoires sont proposés pour construire rapidement un banc de mesure avec des performances métrologiques proches d'un interféromètre. Des instruments de mesure incluant des analyseurs de surface d'onde sont aussi disponibles pour les utilisateurs ne disposant pas de compétences spécifiques en métrologie optique ou ne voulant pas mobiliser ces compétences pour la mise en place de protocoles métrologiques.

**Optique adaptative et lasers**

L'un des domaines de prédilection des analyseurs de front d'onde est la métrologie des faisceaux lasers et leur correction par des méthodes d'optique adaptative. Comme il est possible de connaître le champ électromagnétique dans un plan, on peut prédire sa propagation future ou antérieure. De cette façon, on peut simuler la forme de la tache de focalisation (champ lointain) mais aussi estimer les paramètres du faisceau dont le  $M^2$ , la position et la taille du waist. L'avantage des analyseurs de surface d'onde est que cette mesure est faite en une seule acquisition et permet donc de caractériser des lasers impulsionsnels ou d'étudier la dynamique de faisceaux continus.

Même s'ils sont capables de révéler des aberrations d'ordres élevés, ce sont des outils simples, fiables et précis pour le suivi du tilt des lasers et le contrôle de la collimation.

**Imagerie biologique : contraste, mesures, masse sèche, suivi du métabolisme**

Comme évoqué plus haut, lorsque le nombre de points de mesure est suffisant, un analyseur de surface d'onde devient une caméra de phase. En microscopie, cette imagerie de phase est dite quantitative, en comparaison avec les méthodes de contraste de phase non quantitatives comme le DIC ou le contraste de Zernike. Elle produit des images contrastées sans marquage. Ceci réduit les étapes de préparation des ●●●



**YOKOGAWA** 

**NOUVEAUX MODULES OTR**

Réflectomètre optique  
**AQ7280**

**R&D et Production**

Norme IEC 60793-1-40

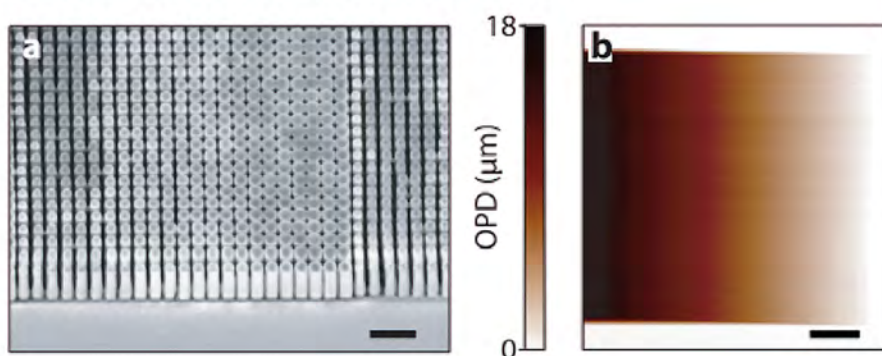
AQ7286	A	1310 42	1550 40	
	H	1310 42	1550 40	1625 39
	J	1310 42	1550 40	1625 39

Distribué par Wavetel :  En savoir plus : 

[www.wavetel.fr](http://www.wavetel.fr)  
[sales@wavetel.fr](mailto:sales@wavetel.fr)

*Acteur de la performance des infrastructures et des applications : Optique, Télécoms, Réseaux, Cybersécurité*

### Effective-Refractive-index metasurface



**Figure 5.** Imagerie de phase d’une métasurface. Image en microscopie électronique de la métasurface (a). Différence de phase mesurée par caméra de phase.

Images reproduites avec la permission de ACS, S. Khadir et al., ACS Photonics 8, 603 (2021).

échantillons et permet l’observation de cellules et de tissus rapidement après leur prélèvement. Les cellules observées peuvent même être réimplantées car elles n’ont pas été modifiées pour par exemple devenir fluorescentes. Comme les images de phase ne sont pas uniquement constituées de niveaux de gris, l’information qu’elles contiennent peut être exploitée pour faire des études statistiques ou pour réaliser du traitement d’images, comme des filtres fréquentiels.

Une application phare est par exemple le suivi du métabolisme des cellules. En effet, on peut montrer que la somme des valeurs de phase mesurées dans une cellule est proportionnelle à la masse sèche de celle-ci. En observant les cellules, on peut donc les peser en temps réel. Cela apporte des perspectives incroyables pour le screening de médicaments : certaines équipes sont capables de déterminer l’efficacité d’un traitement contre le cancer en quelques heures en regardant la réponse métabolique des cellules à différentes drogues. Enfin, l’analyse de front d’onde est maintenant communément utilisée grâce à l’optique adaptative pour

améliorer les performances d’imagerie des microscopes en termes de résolution et de sensibilité.

#### Analyse de matériaux micrométriques : guides d’onde, métasurfaces, polarisabilité, température (analyse par modèle)

Mais l’imagerie de phase quantitative s’applique également à la science des matériaux pour laquelle les analyseurs de surface d’onde se révèlent des outils indispensables. Comme la phase est reliée au chemin optique parcouru par la lumière, elle transporte tout l’historique de l’indice des milieux traversés lors de la propagation. Si l’on place un objet transparent dans un faisceau lumineux dirigé vers un analyseur de surface d’onde, on peut remonter à ses propriétés optiques. Si l’on connaît les symétries géométriques du milieu, on peut remonter numériquement à la valeur de l’indice et de la densité du milieu. Ceci est appliqué aux jets de gaz, plasma ou à la caractérisation des écoulements en soufflerie. Si l’on ne

connait pas la symétrie du système, on peut réaliser des mesures tomographiques et retrouver la répartition 3D de l’indice par des méthodes d’holographie diffractive. En modélisant le comportement thermique d’un milieu, on peut remonter à la répartition de l’échauffement d’une surface en mesurant la phase accumulée lors de la propagation dans le milieu chauffé. Enfin, on peut utiliser l’effet Kerr (l’indice est modifié instantanément par l’intensité du faisceau qui traverse le milieu) pour faire des instantanés de faisceaux ultra-courts : une impulsion se déplace dans un morceau de verre et un faisceau sonde ultra-court se propage perpendiculairement à celle-ci. L’image de phase obtenue est une trace de là où se trouvait l’impulsion au moment du passage de l’impulsion sonde.

#### CONCLUSION

Les analyseurs de front d’onde sont des instruments de haute précision permettant de caractériser un grand nombre de phénomènes optiques. Ils ne sont plus uniquement utilisés comme des supplétifs bon marché aux interféromètres mais donnent accès à des applications nouvelles dont la liste s’allonge continûment. Leur utilisation n’est plus limitée à des experts de la métrologie notamment parce que les fabricants proposent des systèmes métrologiquement fiables mais surtout suffisamment robustes pour être utilisés dans des conditions expérimentales très diverses. Enfin, les logiciels proposent des modules d’interprétation bien adaptés aux différents métiers. ●

FOURNISSEURS FRANÇAIS	SITE INTERNET
Alpao	<a href="http://www.alpao.com">www.alpao.com</a>
Imagine Optic	<a href="http://www.imagine-optic.com">www.imagine-optic.com</a>
Phasics	<a href="http://www.phasics.com">www.phasics.com</a>
Thorlabs France	<a href="http://www.thorlabs.com">www.thorlabs.com</a>
Trioptics France	<a href="http://www.trioptics.fr">www.trioptics.fr</a>

## DIODE LASER 488NM 300MW

Le LBX-488 est maintenant disponible en 300mW. Il se compose d'une diode laser avec un pilote intégré.



Le LaserBoxx offre une excellente stabilité et des capacités de modulation rapide qui le rendent idéal pour la microscopie de fluorescence, l'imagerie de super résolution, la microscopie confocale, la citométrie de flux, le séquençage ADN, l'optogénétique, ...

<https://www.oxius.com/products/lbx-488/>

## Spectromètre Raman DUV

ODIN est un tout nouveau spectromètre Raman "Deep UV" compact, fiable et abordable développé par IS-Instruments. La très haute efficacité du spectromètre associée à une excitation à très basse longueur d'onde, 228.5 nm, générant un signal Raman très élevé sans perturbation par la fluorescence, ouvre des perspectives inédites d'analyse moléculaire dans de nombreux domaines.



<https://www.optonlaser.com/produit/spectrometre-raman-deep-uv-integre-odin>

## Microscope confocal de fluorescence à comptage de photon unique



Luminosa de chez PicoQuant propose un système simplifié d'utilisation associant toutefois une grande sensibilité pour la microscopie de fluorescence résolue en temps. Le système Luminosa comprend notamment une procédure d'alignement automatique. Le système peut reconnaître automatiquement des molécules individuelles ou déterminer les facteurs de correction pour le FRET de molécules uniques (smFRET) automatiquement.

<https://www.optonlaser.com/produit/microscope-de-fluorescence-confocal>

## Unité MEMS confocale pour la microscopie de fluorescence



Hamamatsu Photonics lance MAICO®, une unité MEMS confocale pouvant être couplée à tout microscope afin d'obtenir un microscope

confocal de fluorescence. MAICO® contient tous les composants nécessaires à l'excitation et à la détection de chaque bande de fluorescence dans une seule unité, permettant l'observation d'un seul canal mais aussi l'excitation et l'observation simultanées, allant jusqu'à quatre canaux (405 nm, 488 nm, 561 nm et 638 nm).

[https://www.hamamatsu.com/eu/en/news/featured-products\\_and\\_technologies/2022/20220615000000.html](https://www.hamamatsu.com/eu/en/news/featured-products_and_technologies/2022/20220615000000.html)

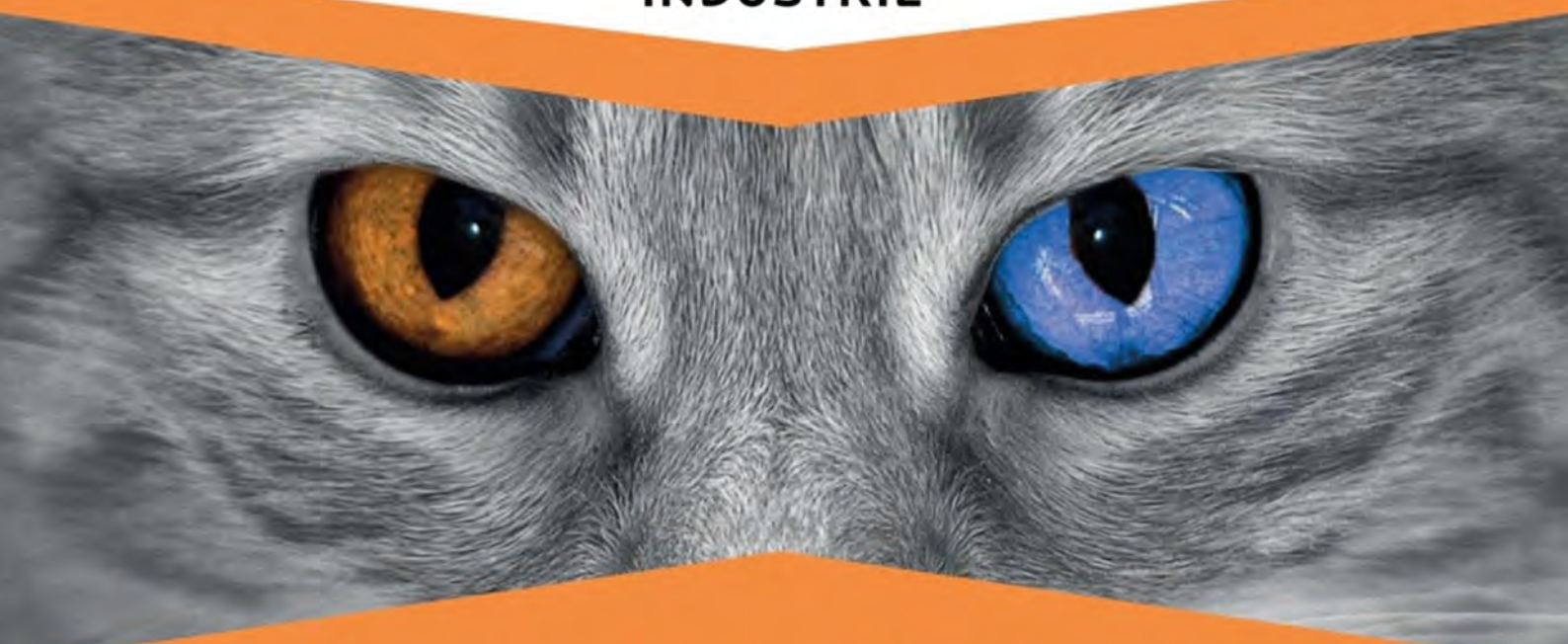
## ANALYSEUR DE SPECTRE OPTIQUE HAUTE RÉOLUTION

ARAGON PHOTONICS lance son nouvel analyseur de spectre optique haute résolution, le BOSA 500. Ce nouvel instrument d'analyse peut mesurer



n'importe quel signal optique dans les bandes O, S, C et L avec une excellente précision. Grâce au filtrage Brillouin, éliminant les bruits parasites, le BOSA 500 offre une résolution optique de 10 MHz et une précision sub-picométrique sur la plage de longueur d'onde de 1265nm à 1615nm. L'écran peut être divisé en deux afin d'afficher deux bandes spectrales différentes en même temps.

<https://www.wavetel.fr/produits/laboratoire-optique/analyseur-de-spectre-optique-multibandes-bosa-500>



Vous aider à construire Votre futur

**INDUSTRIE**



Solutions **standards**

**ENGINEERING**



Projets **customs**

**Une entreprise structurée pour répondre aux différents marchés**

## Expertise

- Photométrie/Radiométrie
- Colorimétrie/ Spectroscopie
- Laser / Sécurité Laser

## Compétences

- Optomécanique
- Design optique / Intégration
- Gestion de projet
- Service et calibration



[Sales@ardop.com](mailto:Sales@ardop.com)



Tel : +33.5.40.25.05.36