

Photoniques

LA LUMIÈRE ET SES APPLICATIONS

ENTRETIEN

J.-P. Huignard
et M. Papuchon

FOCUS

La Commission
internationale d'optique

OSEZ L'OPTIQUE

Optique frugale pour
l'imagerie Infrarouge

EXPÉRIENCE

1994 : naissance
d'un atome artificiel

DOSSIER

OPTIQUE & DÉFENSE

- Utiliser la lumière pour voir dans les coins
- Les lasers et l'optique adaptative
- Essor des communications optique en espace libre
- Les armes laser : panorama et développements récents



- Le laser Megajoule
- Aux origines de l'Institut d'Optique : la mission scientifique française aux Etats-Unis



Make it EPIC!

Driving Competitiveness of
European Photonics Industry
through an International Network

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

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

Directeur de publication

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

Rédaction

Rédacteur en chef

Nicolas Bonod

nicolas.bonod@edpsciences.org

Journal Manager

Florence Anglézio

florence.anglezio@edpsciences.org

Secrétariat de rédaction et mise en page

Agence de communication la Chamade

<https://agencelachamade.com/>

Comité de rédaction

Marie-Begoña Lebrun (Phasics),
Adeline Bonvalet (CNRS),
Benoît Cluzel (Université de Bourgogne),
Sara Ducci (Université de Paris),
Céline Fiorini-Debuisschert (CEA),
Sylvain Gigan (Sorbonne Université),
Aurélien Jullien (CNRS),
Patrice Le Boudec (IDIL Fibres Optiques),
Christophe Simon-Boisson (Thales LAS France).

Advertising

Bernadette Dufour

Cell phone + 33 7 87 57 07 59

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

Impression

Fabrique imprimeur

B.P. 10

87500 Saint-Yrieix la Perche

Dépôt légal : juin 2024

Routeage : STAMP (95)



© EDP Science/SFP à l'exception des articles publiés avec une licence CC-BY dont les droits reviennent aux auteurs.

Éditorial



NICOLAS BONOD

Rédacteur en chef

Obscure Clarté

« Cette obscure clarté qui tombe des étoiles, Enfin avec le flux nous fait voir trente voiles » - *Le Cid* de Corneille. Ce célèbre oxymore montrant l'importance du flux de lumière, fût-il si faible pour visualiser une scène, illustre fort bien le thème de ce numéro, « Optique et Défense ».

La motivation pour vous proposer ce numéro était grande car les besoins technologiques et scientifiques de la défense ont largement contribué à façonner, depuis le début du vingtième siècle, l'écosystème de l'optique-photonique française. Le secteur de la défense français s'appuie sur un réseau dynamique d'entreprises, d'institutions et d'organismes, dont de très grands acteurs économiques, capables de financer des programmes de recherche et développement innovants et ambitieux. Il recrute de nombreux étudiants issus de nos filières de formation et pousse dans son ensemble la filière de la photonique. Sources laser, détecteurs de photons, capteurs optiques, optique adaptative, caméras visibles et infrarouges, communication optique, cryptographie, technologies quantiques, ce sont tous ces domaines, parmi tant d'autres, qui sont développés par le secteur de la défense.

Le comité de rédaction s'est appuyé sur les différentes rubriques de la revue pour aborder sous sa grande diversité le lien entre l'optique et la défense. Commençons d'abord par une approche historique : grâce à un formidable travail de recherche mené dans différentes archives, la genèse de

l'Institut d'Optique nous est retracée avec soin en nous embarquant notamment en 1917 à bord de l'expédition de scientifiques vers les Etats-Unis avec Armand de Gramont et Charles Fabry. Vous découvrirez dans le sommaire une nouvelle rubrique « Grands projets scientifiques » qui vous emmènera au cœur du laser Mégajoule. Imaginé et initié dans les années 1990, ce projet est aujourd'hui dans une phase cruciale de développement avec 11 des 22 chaînes laser d'ores et déjà opérationnelles. Vous découvrirez les performances atteintes lors des dernières campagnes et la préparation à la montée en puissance pour atteindre l'énergie nominale de 1.3 MJ. Osez l'Optique s'intéresse à l'optique frugale, un concept que nous aimons mettre à l'honneur dans ces pages, pour l'imagerie infrarouge. Les 4 articles du dossier vous feront découvrir certains des concepts phares développés actuellement pour la défense, que ce soit les caméras à photodiode à avalanche pour la détection de photons uniques permettant une vision hors ligne de visée, l'optique adaptative pour contrôler la propagation de faisceaux laser dans l'atmosphère, les communications optiques en espace libre, ou les armes de défense laser. Enfin, ne manquez pas le premier entretien croisé entre 2 chercheurs que nous vous proposons dans ces pages pour aborder les travaux fondateurs menés au LCR dès les années 1970. Nous continuerons dans les prochains numéros de mettre en lumière les travaux pionniers, trésors parfois cachés, de nos équipes de recherche.



Sommaire

www.photoniques.com

N° 126

19 FOCUS

La Commission internationale d'optique
le lieu de rencontre du monde de l'Optique

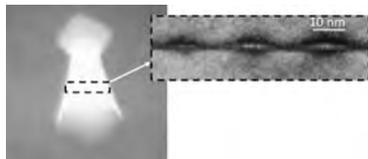


22

Le laser Megajoule

32

1994 : naissance
d'un atome artificiel
pour la photonique
quantique



ACTUALITÉS

- 03 Éditorial et actualité de la SFO
- 05 Informations partenaires
- 11 Mots-croisés : l'optique et la défense
- 12 Actualités scientifiques
- 14 Entretien : Jean-Pierre Huignard et Michel Papuchon
- 18 Témoignage d'entrepreneur : Pierre Potet

FOCUS

- 19 La Commission internationale d'optique
le lieu de rencontre du monde de l'Optique

GRAND PROGRAMME SCIENTIFIQUE

- 22 Le laser Megajoule

OSEZ L'OPTIQUE

- 27 Optique frugale pour l'imagerie Infrarouge

EXPÉRIENCE MARQUANTE

- 32 1994 : naissance d'un atome artificiel
pour la photonique quantique
- 37 Aux origines de l'Institut d'Optique : la mission
scientifique française aux États-Unis

DOSSIER : OPTIQUE ET DÉFENSE

- 41 Utiliser la lumière pour voir dans les coins
- 46 Les lasers et l'optique adaptative
- 51 Essor des communications optique
en espace libre
- 57 Les armes laser :
panorama et développements récents

PRODUITS

- 61 Nouveautés

Annonces

EPIC **II° de couv.**
HEF photonics **33**
HTDS **29**

IDIL Fibres Optiques **43**
Imagine optic **47**
Opton Laser **IV° de couv.**
Prolite **49**

Scientec **45**
Spectrogon **25**
Spectros **17**
Trioptics **31**

Vision **59**
W3 fair **53**
Wavetel **55**

Crédit photo (couverture) : ©iStockPhoto

L'édito de la SFO



FRANÇOIS SALIN
Président de la SFO



ARIEL LEVENSON
Président sortant de la SFO

Lumières normandes et gourmandes

Notre congrès OPTIQUE Normandie 2024 est à l'horizon, certains d'entre vous découvriront cet édito au milieu de son effervescence. Profitons de l'occasion pour mettre en lumière les richesses du patrimoine normand. Nous ne nous référons pas à ces merveilles qui suscitent l'engouement touristique, le Mont Saint-Michel, les tapisseries de Bayeux, les falaises d'Étretat, ou encore à celles que nous pourrions visiter pendant la semaine du congrès, comme la cathédrale Notre Dame de Rouen ou la Tour du Gros-Horloge. Nous ne pensons pas, ou du moins essayons de ne pas trop le faire, au camembert, aux huitres, aux coquilles Saint-Jacques, au cidre, au calvados, qui nous attendent. Grand merci aux collègues du comité local d'organisation ! C'est plutôt sur la richesse du patrimoine de l'optique normande que nous souhaitons nous attarder, en nous concentrant sur ses racines profondes car la place nous manque pour l'exhaustivité.

Dès que l'on mentionne la décomposition de la lumière blanche on pense à... Newton, évidemment. Pourtant la chose a été prévue quelques siècles plutôt par Nicole Oresme (1320-1382). Ce natif de Fleury-sur-Orne, ville limitrophe de Caen anciennement appelée Allemagne, fort de solides connaissances en musicologie et en mécanique ondulatoire a théorisé en pionnier que « les couleurs font partie de la lumière blanche ». Il est vrai qu'Oresme était un touche-à-tout génial, traducteur français d'Aristote, physicien, astronome, mathématicien, économiste, musicologue, philosophe, théologien. Si le dithyrambe vous semble exagéré, ajoutons parmi ses nombreux exploits la compréhension de la réfraction atmosphérique et sa conséquence sur la déviation de la lumière avec les « rectifications des lignes courbes ». Exploit, fort utile en astronomie pour éviter les erreurs de positionnement des étoiles, qu'il a réalisé plus de 300 ans avant la « découverte » de Hooke et la formalisation de Newton. Née aux abords de Caen et Doyen de la cathédrale de Rouen, Nicole Oresme relie à merveille Patrice Camy et Ammar Hideur, nos chers chairs d'OPTIQUE Normandie.

Le nom “de Broglie” évoque pour les scientifiques que nous sommes le prénom Louis et la révolution conceptuelle de la théorie ondulatoire de la matière. Cet illustre dieppois, Prix Nobel 1929, est issu d'une famille de la noblesse normande à laquelle on doit le nom de la ville homonyme. La ville de Broglie, où Louis séjourna, a vu le jour sous ce nom en 1742. Moins de cinquante années plus tard y naissait un opticien incontournable, le bâtisseur de la théorie ondulatoire de la lumière, Augustin Fresnel (1788-1827). Pour construire et faire accepter cette théorie, il lui aura fallu une merveilleuse intuition et bien d'audace pour oser démystifier un certain nombre de totems, dont la théorie de l'émission. Il est impressionnant de constater l'étendue de l'héritage : compréhension de la diffraction, polarisation transversale de la lumière, biréfringence, méthodes mathématiques dont les intégrales de Fresnel, ... Tout cela en un temps, hélas, très restreint. Augustin Fresnel est mort à l'âge de 39 ans.

La ville de Broglie se situe quasiment à la même distance de Rouen, Caen et Le Havre, les trois villes où se trouvent le CORIA, le CIMAP, le GPM, le SMS et le LOMC, laboratoires qui perpétuent la tradition d'excellence de l'optique normande et qui nous font l'honneur de nous accueillir à OPTIQUE Normandie. Au plaisir de vous retrouver à Rouen pour déguster avec gourmandise l'excellence de l'optique française et les richesses du terroir. Après tout, si Fresnel lui-même utilisa le miel comme lentille, pourquoi ne pourrions-nous pas tester les propriétés non-linéaires du calva, avec modération bien sûr.

Photoniquement vôtre
Ariel Levenson
Directeur de recherche CNRS
Président sortant de la SFO
François Salin
Président et CEO Ilasis laser
Président de la SFO

Prix international Lumières Arnulf-Françon : les lauréats 2023 et 2024

Le Prix Lumières Arnulf-Françon 2023 a été décerné à l'ouvrage collectif « Le solaire photovoltaïque en France : réalité, potentiel et défis », disponible gratuitement sur solairepv.fr et dont la réalisation a été coordonnée par Stéphane COLLIN et Jean-François GUILLEMOLES (Fédération de Recherche du Photovoltaïque). Ce guide reprend en un peu moins de 50 questions les principaux aspects du photovoltaïque en France, et est adapté à tout niveau de lecture depuis les non-spécialistes jusqu'aux plus curieux. Il s'agit d'une œuvre importante qui tombe à point, sur un sujet qui nous concerne tous : l'énergie, et l'apport de l'optique-photonique.

Le Prix Lumières Arnulf-Françon 2024 récompense « Introduction to Nanophotonics » de Henri BENISTY, Jean-Jacques GREFFET et Philippe LALANNE (Institut d'Optique). Ce livre ambitieux et complet fait déjà figure de référence, que ce soit par l'ampleur et la variété des thèmes abordés, par les très nombreuses démonstrations qu'il contient, ou par la richesse des exercices originaux qu'il propose en application et illustration de chacun des 21 chapitres. Il fait le lien entre les bases historiques et fondamentales de l'optique électromagnétique et les avancées les plus modernes dans ce domaine.



CÉRÉMONIES DES PRIX

Le Grand Prix Léon Brillouin
Mardi 02 juillet

Le prix Fabry de Gramont
Mardi 02 juillet

Le prix Jean Jerphagnon
Mercredi 03 juillet

Le Prix Lumières Arnulf Françon
Vendredi 05 juillet

Souhaitons un bel avenir à ces 2 ouvrages, qui contribuent de façon éclatante à la diffusion des savoirs en optique-photonique.

La Société Française d'Optique remercie chaleureusement l'implication des membres du jury de cette nouvelle édition francophone et internationale du prix Lumières Arnulf-Françon :

Zohra BEN LAKHDAR, Membre de l'Académie tunisienne des sciences, des lettres et des arts (Tunisie)

Nicolas BONOD, Directeur de recherche CNRS. Rédacteur en chef de Photoniques (France)

Riad HAIDAR, Directeur scientifique général de l'ONERA (France) – Président du jury

Sophie LAROCHELLE, titulaire de la chaire de recherche du Canada en technologies photoniques d'avant-garde pour les communications. Directrice du Centre d'Optique, Photonique et Lasers (Canada)

Philippe LECLERE, Président de PromOptica, (Belgique)

Alexandre MOATTI, Membre du Conseil scientifique du musée des instruments scientifiques de l'École polytechnique (MUSIX). Secrétaire général de la fondation Georges Besse (France).

Le Grand Prix Léon Brillouin :
voir pages 12-13

Le Prix Fabry de Gramont :
voir Photoniques 127

Le Prix Jean Jerphagnon :
voir Photoniques 127

	Lauréat 2023	Lauréat 2024
<p>Le Prix Lumières Arnulf Françon</p>	<p>Le solaire photovoltaïque en France : réalité, potentiel et défis</p> <p>COLLIN Stéphane GUILLEMOLES Jean-François</p>	<p>Introduction to Nanophotonics</p> <p>BENISTY Henri GREFFET Jean-Jacques LALANNE Philippe</p>

BIPSA 2024

L'édition 2024 de l'évènement néo-aquitain BIPSA (Bio-Imagerie Photonique et Santé en Nouvelle-Aquitaine) sera dédiée aux avancées et aux perspectives des nouvelles technologies en imagerie médicale.



Crédit photo : ©CHU de Poitiers

Coorganisée par le pôle de compétitivité ALPHA-RLH et le laboratoire I3M* (Imagerie Métabolique Multi-noyaux Multi-organes) qui exploite les données du seul IRM 7T à usage clinique en France, elle se tiendra au CHU de Poitiers le 16 octobre 2024.

Au cours de la journée, les intervenants partageront leur expertise sur les avancées scientifiques et technologiques dans le domaine du signal et de l'imagerie pour la santé, favorisant l'émergence de projets d'innovation.

Ouvert aux chercheurs, cliniciens, ingénieurs, industriels et étudiants, BIPSA 2024 sera rythmé par des conférences, une session de posters, des stands et des moments d'échanges et de networking. La rencontre sera clôturée par la visite de la plateforme IRM 7T (imagerie par résonance magnétique ultra haut champ).

*I3M est un laboratoire commun au CNRS, au CHU de Poitiers, à l'Université de Poitiers et à la société Siemens Healthineers.

JOURNÉES

« CONTRÔLE ET MÉTROLOGIE OPTIQUE »



Depuis 2021, le pôle ALPHA-RLH réunit chaque année la communauté photonique française autour d'un évènement thématique.

Après les journées « Surfaces optiques » en 2021, « Fibres optiques » en 2022 et « Du matériau au composant photonique » en 2023, le pôle ALPHA-RLH rassemblera de nouveau les experts industriels et scientifiques de la photonique et de l'optique, pour

deux journées dédiées au contrôle et à la métrologie optique les 13 et 14 novembre 2024. PME, ETI, grands groupes et laboratoires de recherche se retrouveront au Cockpit à Mérignac, nouveau site au cœur du bassin aéronautique de Bordeaux Métropole, afin de partager les dernières avancées technologiques, échanger, réseauter, mais également visiter des acteurs locaux.

Les conférences seront axées sur le contrôle dimensionnel, la mesure des états de surface, la caractérisation physico-chimique des matériaux et la vision industrielle, outils optiques largement déployés dans l'industrie.

Ils ont rejoint le pôle



ALPHA-RLH a le plaisir d'accueillir 6 nouveaux adhérents dans le domaine photonique-laser :

- **ENSSAT** : l'École Nationale Supérieure des Sciences Appliquées et de Technologie est une école d'ingénieurs en informatique, photonique et systèmes numériques.
- **EREM** : études et réalisation d'ensembles mécaniques.
- **Otonomy Aviation** : leader mondial dans le domaine des caméras haute définition pour l'aéronautique. Propose des caméras qui permettent de couvrir à 360° un périmètre au sol et une observation en vol.
- **Percipio Robotics** : développe, qualifie et implémente des solutions robotiques pour saisir, manipuler et assembler les composants microtechniques avec la plus grande précision.
- **PhotonikBiz** : aide les entreprises de l'industrie photonique à développer leurs ventes à l'international.
- **Reuniwatt** : propose des solutions de pointe pour l'observation à haute résolution du couvert nuageux et du rayonnement solaire, ainsi que des prévisions de l'énergie solaire et éolienne.

AGENDA

■ 1^{ère} Ecole d'été
« TALENTS Photonique »
8 au 12 juillet à Talence

■ BIPSA 2024
16 octobre à Poitiers

■ INPHO Venture Summit
24 et 25 octobre à Bordeaux

■ Journées « Contrôle
et Métrologie optique »
13 et 14 novembre à Mérignac

Contact : David Balagea
d.balagea@alpha-rlh.com

Tous les évènements sur :
www.alpha-rlh.com

OPTICLEAN : UN NOUVEAU CAPTEUR OPTIQUE

Elodys International a développé, avec le support des ingénieurs de Photonics Bretagne, un capteur optique, OptiClean. Il permet d'optimiser les phases de nettoyage des process dans le secteur agroalimentaire, cosmétique et pharmaceutique. Photonics Bretagne a notamment réalisé une preuve de concept avant d'effectuer un transfert vers un industriel. Basé sur un principe de spectrophotométrie UV et IR, il permet de mesurer en ligne la variation de la charge organique contenue dans les solutions lessiviellles de NEP et ainsi de déterminer la recette de lavage optimale. Aujourd'hui, ce sont plus de 350 capteurs qui sont installés en France mais aussi dans le monde (USA, Belgique, Pologne, Italie, Mexique, Egypte, ...)!

Un nouveau siège social pour Ekinops

Ekinops, l'un des principaux fournisseurs de solutions de transport optique et de connectivité d'entreprise, a déménagé son siège social dans de nouveaux locaux à Lannion à l'occasion de ses 20 ans. Le site de 20 000 m², idéalement situé au cœur du centre historique des technologies de télécommunications en France, accueille plus d'une centaine de salariés. Ces nouveaux locaux reflètent la croissance du groupe, tant en termes de chiffre d'affaires que d'effectifs, et la nécessité de disposer d'un espace approprié pour l'ensemble des activités centrées sur l'innovation, le développement de logiciels, la production d'équipements de pointe et la formation des opérateurs télécoms. Une inauguration qui marque également le départ à la retraite du cofondateur d'Ekinops, François-Xavier Ollivier.

AGENDA

■ AG Photonics Bretagne
5 juillet, Lannion

Business Meeting La Photonique pour l'agriculture

La Photonique pour l'agriculture était au centre de toutes les discussions du Business Meeting coorganisé par Photonics France et Photonics Bretagne le 31 mai à Rennes, soutenu par Vegepolys Valley, OptoPartner, et Hamamatsu.



Les deux structures ont offert une belle vitrine à 5 conférenciers - l'institut technique agricole Arvalis, le Groupe Roullier, l'institut de l'élevage Idele, Bioplants, et Tematsy - qui ont pu présenter leurs problématiques et leurs recherches le matin. Des sujets qui ont suscité de nombreux échanges durant les temps de réseautage, notamment l'après-midi lors des ateliers où les participants se sont réunis autour des conférenciers. C'était également l'occasion de rappeler quel rôle peut jouer Photonics Bretagne grâce à son expertise agrophotonique, ainsi que les opportunités de financement du projet PhotonHub Europe. Une journée très qualitative pour une agriculture plus sobre et respectueuse de l'environnement !

UCAIR : un projet pour le diagnostic précoce du cancer

Les 23 et 24 mai, les 10 partenaires du projet uCAIR se sont réunis à Lannion : Photonics Bretagne, University of Limerick, Multitel, LLS ROWIAK LaserLabSolutions GmbH, Lambda-X High Tech, Femto-st - laboratoire du CNRS, Leibniz Institute of Photonic Technology, Friedrich Schiller University Jena, Altinbas University, Institute of Scientific Instruments of the CAS, et VDI/VDE Innovation + Technik GmbH. Photonics Bretagne les a accueillis dans ses locaux durant 2 jours pour une réunion d'avancement technique et de gestion du projet.



Les partenaires ont ainsi eu l'occasion de visiter la plateforme technologique, notamment la tour de fibrage et le banc MCVD, et de constater l'étendue des compétences qui contribueront à la réussite du projet.

Le but du projet uCAIR -

Ultra-fast Chemical Analysis Imaging with Raman - est de développer une technologie photonique pour le diagnostic précoce du cancer. Il s'agit d'une solution d'imagerie en temps réel utilisant l'empreinte sans étiquette de biomarqueurs dans les biofluides et les tissus (*ex vivo* et *in vivo*). Cela permettrait de détecter les perturbations au niveau moléculaire du cycle de vie des cellules biologiques et de modifier radicalement les soins de santé en remplaçant les longs processus d'analyse des biopsies, qui peuvent prendre plusieurs jours, par une prise de décision en ligne pratiquement instantanée. De belles promesses en perspective !

[Optopartner]

Spotter, la solution pour les industries de production en masse !



brilliant so[ft]lutions

Dans le cadre du projet de recherche collaboratif Ivsila (Intelligent Vision System for In-Line Analysis of baked products), cofinancé par l'Union Européenne, Optopartner a développé Spotter, un système de vision par IA révolutionnaire. Cette solution a été spécifiquement conçue pour répondre aux besoins des industries de production en masse, en particulier l'industrie agroalimentaire en ce qui concerne le gaspillage alimentaire.

Ce qui rend Spotter unique, c'est sa capacité à analyser simultanément un très grand nombre d'objets, plusieurs centaines par seconde, dans des environnements contraignants en termes de température, d'humidité et de luminosité.

(Source : LinkedIn, Optopartner)

[Silentsys]

Silentsys, nouveau membre de Systematic !



SILENTSYS développe, produit et commercialise des systèmes innovants à très faible bruit couvrant la photonique, les micro-ondes/THz et les modules électroniques. Leur objectif est de fournir des systèmes hautement compatibles avec les besoins des applications industrielles et de laboratoire émergentes telles que celles liées aux technologies quantiques, les systèmes de capteurs à base de fibre optique, les LIDAR / RADAR, ainsi que les systèmes de métrologie de haute précision. Bienvenue au sein du pôle Silentsys !

[PhotonHub]

PhotonHub: 10^{ème} édition du programme de coaching de préparation à l'investissement et de mise en relation avec des investisseurs



PhotonHub Europe se réjouit de révolutionner le paysage des innovateurs de deep-tech en phase de démarrage avec son programme de préparation à l'investissement. Dans un écosystème d'innovation où il est difficile d'obtenir un financement, l'initiative de PhotonHub Europe fournit des conseils stratégiques pour augmenter les chances de succès. Avec seulement 1 pitch sur 400 recevant le soutien d'un investisseur, naviguer sur ce terrain nécessite une orientation stratégique.

Les prochaines dates pour y postuler : 28 June 2024 et 27 September 2024.

Si vous êtes intéressés, n'hésitez pas à postuler :

<https://www.photonhub.eu/news/investment/10th-cut-off-date/>

En bref

En Essonne, la filière drone francilienne prend son envol :

Le centre d'essais des drones, situé sur l'ex-base aérienne 217, est en plein essor.

Plusieurs dizaines d'entreprises consacrées à la filière ont fait le choix de s'y installer.

Elles devraient bientôt pouvoir utiliser le couloir aérien de vingt kilomètres, réservé aux drones, le premier en France.

(Source : Les Echos)

AGENDA

■ WHAT'S ON Techviz
24 septembre 2024
5 Avenue du Trône
75011 Paris

www.systematic-paris-region.org/evenements/

CONTACT

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

Contactez Najwa Abdeljalil,
Coordinatrice du Hub :
najwa.abdeljalil@systematic-paris-region.org



3200

C'EST LE NOMBRE
D'ÉLÈVES QUI VONT VENIR
DANS LES LOCAUX DE
L'INSTITUT D'OPTIQUE
À PALAISEAU POUR PASSER
LEURS ÉPREUVES ORALES
ET DE TRAVAUX PRATIQUES
DU CONCOURS
CENTRALE-SUPÉLEC
ENTRE LE 24 JUIN
ET LE 19 JUILLET 2024.

AGENDA ÉVÉNEMENTS

■ **Rentrée de la nouvelle promotion d'élèves-ingénieurs**
2 septembre 2024
à Palaiseau

■ **Inauguration du 503**
1^{er} octobre 2024

■ **Fête de la science**
5 et 6 octobre au Village
des Sciences Paris-Saclay

■ **French Photonics Days**
15 et 16 octobre 2024
à Besançon

■ **Forum de la Photonique**
14 novembre 2024 au 503

■ **Gala SupOptique**
15 novembre 2024 au Chalet
du Lac à l'Orée du Bois
de Vincennes (Paris)

■ **Remise des diplômes**
13 décembre 2024
à l'ENS Paris-Saclay

Découvrez nos stages de formation continue sur
www.fc.institutoptique.fr
Contact : 01 64 53 32 15

CONTACT
Clémentine Bouyé,
responsable
de la communication
clementine.bouye@institutoptique.fr

Un nouvel Académicien des sciences à l'Institut d'Optique

Le 4 juin 2024 s'est tenue la séance solennelle de réception des nouveaux membres de l'Académie des sciences élus en 2023. Antoine Browaeys, directeur de recherche CNRS au Laboratoire Charles Fabry, figurait parmi les 18 nouveaux arrivants.



« Il y a plus de 30 ans, alors étudiant, j'apprenais qu'on ne pouvait pas voir un seul atome, et encore moins les contrôler. Aujourd'hui, dans notre laboratoire, [...] ces atomes nous pouvons les voir comme je vous vois. »

C'est ainsi qu'Antoine Browaeys, directeur de recherche CNRS au Laboratoire Charles Fabry (Institut d'Optique / Université Paris-Saclay / CNRS) et nouvellement élu à l'Académie des sciences, a débuté son intervention lors de la séance solennelle de réception des nouveaux membres.

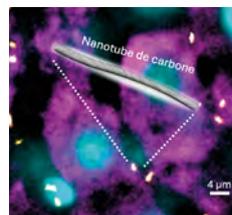
Cette séance toute particulière a eu lieu le 4 juin 2024 sous la coupole du Palais de l'Institut de France en présence des familles, amis et collègues.

Chacun des 18 nouveaux membres a partagé en quelques minutes le cœur de ses recherches. Les nouveaux élus ont exprimé leur gratitude envers la prestigieuse institution qu'ils rejoignent et envers les personnes qui les ont accompagnés professionnellement et personnellement au cours de leur carrière.

L'émotion et la joie étaient palpables tout au long de la cérémonie !

« Mon élection au sein de cette Académie m'a pris complètement par surprise. Elle m'honore bien sûr, mais plus encore elle m'impressionne et m'effraie même un peu. », concluait Antoine Browaeys. Il est le deuxième académicien que compte actuellement le Laboratoire Charles Fabry, le premier étant... Alain Aspect !

Imager la mobilité de nanoparticules pour détecter la fibrose du foie à un stade précoce



© LP2N

La détection de nanotubes de carbone diffusant dans l'espace interstitiel de tissus de foie et l'analyse de leurs mouvements nanométriques (en jaune) permettent de détecter la présence de fibrose hépatique à un stade très précoce dans un modèle murin. (Colorations violette et bleue : cellules hépatiques).

La cirrhose est une maladie grave qui conduit à la perte irréversible des fonctions physiologiques du foie. De nombreuses recherches portent aujourd'hui sur la détection de cette pathologie à un stade précoce, appelé fibrose, qui est réversible. Des chercheurs du Laboratoire Photonique Numérique et nanosciences (LP2N) et du BRIC-BoRdeaux Institute of onCology, avec le soutien du laboratoire RESTORE (Toulouse), ont développé une méthode d'imagerie de la mobilité de nanoparticules infrarouges à ultra-haute résolution permettant de détecter la fibrose du foie à un stade précoce. Dans le cadre d'une collaboration interdisciplinaire, en alliant leurs expertises en nanosciences, en optique, et hépatologie, les équipes ont cartographié les espaces interstitiels du foie et ont observé des encombrements nanométriques qui se forment à un stade précoce de la fibrose chez la souris.

Ce travail est paru dans la revue Nanoletters.

Article : Identification of early-stage liver fibrosis by modifications in the interstitial space diffusive microenvironment using fluorescent single-walled carbon nanotubes. A. Lee, A. A. Simon, A. Boyreau, N. Allain-Courtois, B. Lambert, J.-P. Pradère, F. Saltel, L. Cognet

Photonics France élit son nouveau Conseil d'administration

Photonics France a tenu son Assemblée générale le 13 mai au Hub de Bpifrance. La fédération a renouvelé à cette occasion son Conseil d'administration représentatif de la filière photonique.



Le nouveau Conseil d'administration 2024-2026 a été élu à cette occasion. Ses membres, mandatés par leurs organisations, sont élus par l'assemblée générale pour un mandat de 2 ans. Le nouveau CA est composé de 15 membres qui reflètent la diversité des acteurs de la filière photonique :

11 représentants du collège des adhérents industriels et académiques : Alphanov (Benoît Appert-Collin), Exail (Bruno Desruelle), HEF Groupe (Chantal Germain), Exosens (Claire Valentin), Lumibird (Sébastien Ranc), ONERA (Thierry Fusco), Oxxius (Thierry Georges), Safran (Thierry Dupoux), Savimex (Francois Houbre), SEDI-ATI Fibres Optiques (Jean-François Vinchant), Thales (Franck Leibreich).

4 représentants du collège des adhérents associatifs : ALPHA-RLH (Sébastien Barré), Club Laser et Procédés (John Lopez), Photonics Bretagne (Patrice Le Boudec), SFO (François Salin).

Un grand débat sur le thème « Industrie photonique et RSE » a été lancé à l'issue de l'Assemblée générale. Bpifrance et l'ADEME ont présenté les solutions de décarbonation et les accompagnements financiers proposées par l'État. Des ateliers d'échanges avec les adhérents furent propices pour échanger sur les bonnes pratiques entre adhérents et motiver à l'accélération de leur transition écologique.

Forte de ses adhérents aux tailles et domaines d'action multiples (grands groupes, ETI, PME, start-ups, académiques, associations, fabricants ou distributeurs) Photonics France représente les parties prenantes de la filière photonique et les accompagne dans leur croissance et la défense de leurs intérêts.

French Photonics Days 2024 : les 15-16 octobre à Besançon

Retenez la date ! La 6^e édition des French Photonics Days se déroulera les 15 et 16 octobre 2024 à Besançon sur le thème : « Micro-nanotechnologies photoniques de rupture ».

Photonics France, SupOptique Alumni et l'Institut Femto ST de l'Université de Franche-Comté vous donnent rendez-vous à Besançon pour la 6^e édition des French Photonics Days. Retrouvez-nous les 15-16 octobre à l'Espace Gramont en centre-ville. L'évènement est conçu pour un public technique, mais non spécialiste.

Le programme et les inscriptions seront annoncés à la mi-juin. Ces deux journées permettront de faire le point sur le développement de nouvelles technologies photoniques et leurs applications (conférences, poster des thèses, expositions, financements européens...) et visiter des entreprises du bassin bisontin (Aurea Technology, Exail, Percipio Robotics, Mimento, Femto Engineering, Smartlight...).

L'évènement est organisé avec le soutien de la région Bourgogne Franche-Comté, Grand Besançon Métropole et Témis Technopole Métropole.



AGENDA

Nos prochains rendez-vous :

■ **French Photonics Days**
15 - 16 octobre 2024
Besançon

■ **Business Meeting :**
La Photonique avec le CNRS
22 novembre 2024 - Paris IDF

■ **SPIE Photonics West**
25 - 30 janvier 2025
San Francisco

CONTACTER
PHOTONICS FRANCE

contact@photonics-france.org
www.photonics-france.org

Nouveaux adhérents

Bienvenue à nos nouveaux adhérents : ONET, ALPAO et Silios



• **ALPAO** conçoit et fabrique une gamme complète de composants et de systèmes d'optique adaptative destinés à la recherche et à l'industrie.

• **ONET Technologies** est un leader français de l'ingénierie et des services nucléaires. Il offre à ses clients des prestations intégrées sur l'ensemble du cycle de vie des installations nucléaires et industrielles.

• **SILIOS Technologies** conçoit et fabrique des micro-optiques pour la mise en forme de faisceaux laser et la spectrométrie visible.

Adhérer à Photonics France, c'est bénéficier de nombreux services pour développer votre réseau professionnel et vos activités. C'est contribuer également à une représentation solide de toute la filière photonique auprès des pouvoirs publics. Rejoignez-nous !

Formation complémentaire via la participation à des écoles



L'une des approches pédagogiques utilisées pour la formation des étudiants repose sur la participation à des écoles d'une semaine que

NANO-PHOT organise ou encourage. En complément de leur formation, les étudiants sont invités à tout moment à identifier une school en Europe qui correspond à leur projet professionnel. NANO-PHOT soutient alors le projet financièrement. A titre d'exemple, Jenny Paola Romero Castro, doctorante au sein de NANO-PHOT, a participé du 20 au 31 mai 2024 à la Quantum Information Spring School, sur les technologies quantiques photoniques qui s'est tenue aux Houches, en France. Elle a acquis des connaissances sur les technologies actuelles de l'informatique quantique, allant des principes fondamentaux aux applications pratiques, via plusieurs séminaires donnés par des partenaires industriels de premier plan dans le domaine de la communication, de la simulation, de l'informatique et de la détection quantique. Elle a présenté l'état d'avancement de son projet de recherche sur les circuits intégrés nanophotoniques quantiques et a pu partager son expertise et ses connaissances. Cette School a été une occasion unique pour Jenny d'élargir ses horizons et de favoriser des échanges fructueux d'idées et de connaissances.

AGENDA

■ **Conférence META24**
16 - 19 juillet, Toyama, Japon
<https://metaconferences.org/META24/index.php/META/index>

■ **Conférence NFO-17**
2 - 6 décembre, Melbourne, Australie

CONTACT

<https://nano-phot.utt.fr/>
nanophot@utt.fr



Ouverture de salles blanches pédagogiques

La graduate school (EUR) NANO-PHOT offre un programme de formation master/doctorat sur l'utilisation de la lumière, à l'échelle nano et micro métrique. La formation et la pédagogie sont une préoccupation majeure.

Des salles blanches pédagogiques ont été inaugurées au printemps. NANO-PHOT met à disposition de ses étudiants 100 m² de laboratoires pour la réalisation de travaux pratiques et projets de recherche. Sont maintenant à disposition exclusive des étudiants, sous encadrement d'un technicien dédié :

- Un laboratoire de chimie équipé de hottes, boîtes à gants, réacteurs de synthèse, centrifugeuses
- Une salle blanche munie d'un microscope électronique, évaporateur, spin-coater
- Un laboratoire de caractérisation muni d'un microscope optique, machine de mesure d'angle de contact et spectrophotomètre.

Ces équipements permettent les travaux de recherche allant de la synthèse/fabrication des nano-objets à leur caractérisation structurale et optique.

Workshop en Nanophotonique à Taiwan



Du 21 au 24 avril 2024, une conférence internationale sur la nanophotonique et l'intégration photonique 2024 (NPPI 2024) s'est tenue sur le campus de l'Université nationale des sciences et technologies de Taïwan (NTUST) à Taipei. Cette conférence a été coorganisée par Le Laboratoire Lumière, nanomatériaux et

nanotechnologies (L2n, CNRS-UTT) et le Heterogeneously-integrated Silicon Photonic Integration Center (HiSiPIC) de NTUST qui, parrainé par le ministère de l'éducation de Taïwan, conçoit et fabrique des plaquettes de silicium pour la photonique pour la communication optique/l'interconnexion optique, la détection intelligente, l'informatique quantique photonique et la photonique pour un environnement durable. L'objectif de cette conférence est de promouvoir les interactions dans le domaine de la photonique et des nanotechnologies entre les chercheurs et étudiants de France, de Taiwan, du Japon, des Etats-Unis et d'autres pays. La conférence devrait se tenir chaque année à Taïwan ou en France.

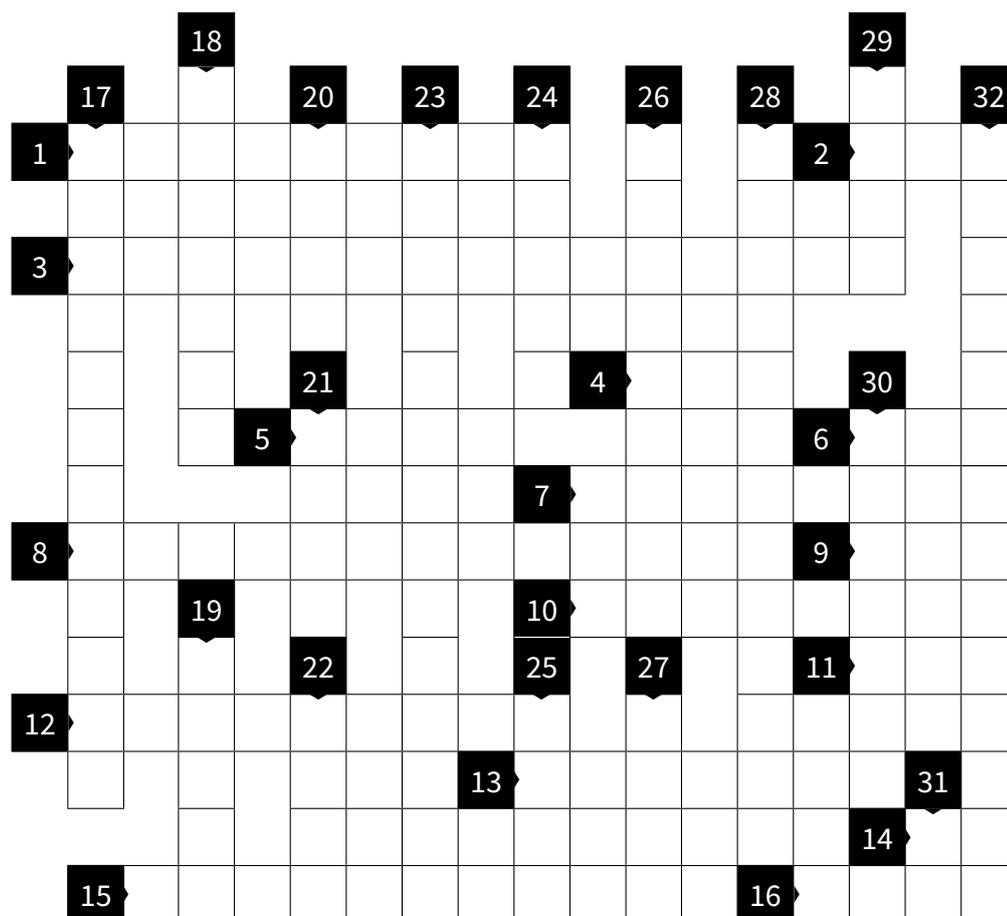
Plus d'information sur https://hisipic.ntust.edu.tw/var/file/110/1110/attach/88/pta_67391_3879636_99482.pdf

Actualités

- Participation active de NANO-PHOT à la conférence SPIE Photonics Europe 2024 Strasbourg, 7-11 Avril.
- Nouvelle école d'été à l'UTT (29-21 Mai) : Quantum- from the lab to new technologies.
- Nouveau recrutement d'étudiants master en mai : plus de 25 excellents dossiers ont été sélectionnés par NANO-PHOT.

MOTS CROISÉS SUR LE THÈME DE L'OPTIQUE ET LA DÉFENSE

Par Philippe ADAM



SOLUTION SUR
PHOTONIQUES.COM



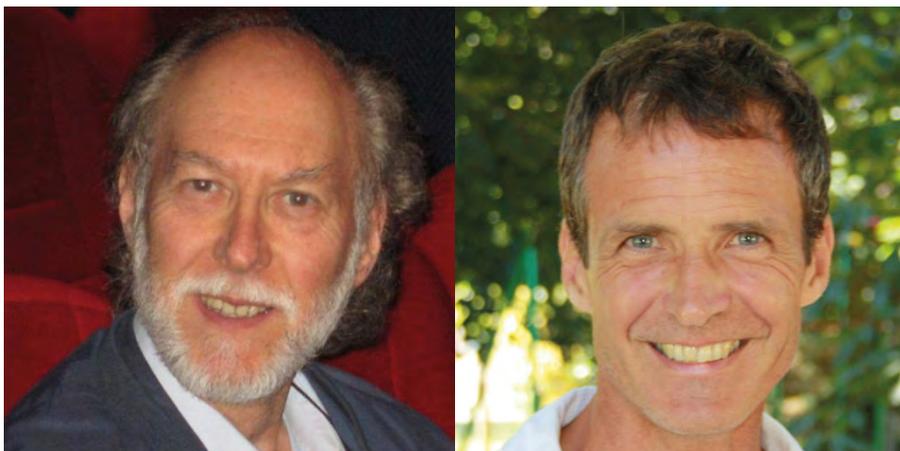
- | | | | |
|----|--|----|--|
| 1 | Fonction confiée à des systèmes d'imagerie thermique | 17 | Reconnaissance de matériels militaires |
| 2 | Très efficace quand il est refroidi | 18 | Missile sol-air à autodirecteur IR et UV |
| 3 | Systèmes optiques de détermination et suivi de trajectoire | 19 | Plateforme aéroportée à pilotage automatique |
| 4 | Engin explosif improvisé | 20 | Matériau cristallin utilisé dans les détecteurs IR et les OEM |
| 5 | Principe d'imagerie spectrale | 21 | Imageur IR à balayage frontal |
| 6 | Contre-mesures optiques | 22 | Pour un aviateur, c'est droit devant |
| 7 | Caméra infrarouge qui regarde vers le bas | 23 | Détermination avec certitude de la nature d'une cible |
| 8 | Réduit la signature d'un engin | 24 | Opposé du zénith |
| 9 | Technique de détection biologique temps réel | 25 | Définit doctrines d'emploi, moyens et besoins optroniques de l'Armée de Terre |
| 10 | Poisson volant ... explosif ! | 26 | Se dit d'une technologie faisant transiter plusieurs signaux par un même canal |
| 11 | Niveau de rayonnement laser sans risque | 27 | Distance au-delà de laquelle les risques oculaires sont nuls |
| 12 | Permet d'éviter de perdre le nord | 28 | Dispositif optronique de guidage automatique de missile |
| 13 | Ce qu'il faut éviter dans la détection de cibles | 29 | Technologie dominante dans les circuits intégrés |
| 14 | Avec LiCAF, composant actif dans des lasers UV accordables | 30 | Source d'information, peut être actif ou passif |
| 15 | Illumination laser d'une cible | 31 | Avec le sélénium, il est transparent dans l'IR |
| 16 | Dispositif à transfert de charges | 32 | Technologie chaud devant ! |

Grand prix Léon Brillouin de la SFO : portrait des 2 lauréats

Jean-Claude Simon, co-lauréat du Grand Prix Léon Brillouin de la Société Française d'Optique pour ses contributions pionnières à l'amplification optique pour les télécommunications et son rôle structurant du pôle lannionnais de l'optique française.

L'amplification optique ne devait pas jouer de rôle dans les communications optiques, c'était écrit. Les raisons étaient imparables, en termes de faible bande passante et de bruit rajouté, incompatible avec le traitement de faibles signaux. Les arguments étaient solidement défendus par des sommités de l'optique et ce, jusqu'à la fin des années 80. On peut encore les trouver dans un ouvrage d'optique célèbre de l'époque. L'histoire a en été tout autre et dans cette épopée qui est allée en dehors des « évidences », Jean-Claude Simon, co-lauréat du Grand Prix Léon Brillouin de la SFO, a joué un rôle crucial.

Le parcours de Jean-Claude Simon est tout à fait singulier. Après un DEA en Optique cohérente réalisé à l'Université Paris-Sud (actuellement Paris Saclay), il intègre l'antenne lannionnaise du Centre National d'Études des Télécommunications en tant que stagiaire-doctorant puis ingénieur-chercheur. Sa thèse, dirigée par Serge Lowenthal et soutenue en 1975, portait sur l'amplification optique intégrée dans des guides polymères dopés avec des colorants. Suite à celle-ci, il développe des études sur l'amplification dans les lasers à semi-conducteur en contribuant à la toute première démonstration d'amplification dans la fenêtre spectrale autour de 850nm. Cette démonstration, la première mettant en évidence une amélioration du rapport signal sur bruit, n'a pas suffi à contredire l'intuition ambiante et toujours en vogue plus d'une décennie plus tard : l'amplification optique n'est pas une solution pour les communications optiques. Pendant la vingtaine d'années qui ont suivi, Jean-Claude Simon n'a cessé d'apporter des réponses concrètes et pratiques qui ont fini par s'imposer. Parmi celles-ci,



Jean-Claude Simon (à gauche) et Philippe Lalanne (à droite)

citons l'amplification monomode à 1,5 microns pour les communications par fibre optique et l'amplification en ligne avec pour la première fois une réduction des distorsions non-linéaires.

Aujourd'hui, certes aidé par l'arrivée de l'erbium comme milieu actif dans des fibres en silice, nul ne saurait douter de l'apport incontournable de l'amplification optique pour la propagation et la régénération de faibles signaux. Cette évidence doit énormément aux travaux pionniers et à l'opiniâtreté de Jean-Claude Simon. Tout en menant ces travaux de recherche, Jean Claude co-organise le premier congrès ECOC qui va devenir la plus large conférence sur les communications optiques et continue à développer des technologies indispensables pour l'utilisation des amplificateurs semi-conducteurs comme des traitements anti-reflets de très haute qualité ou des lasers à modulateurs intégrés qui sont largement utilisés de nos jours.

Revenons à son parcours, que nous avons dit atypique. A la fin des années 90, l'heure est à la fermeture

des laboratoires du CNET. Le dictat est tombé et ce sont des pans entiers d'activités qui doivent être arrêtés, y compris ceux pour lesquels la France est en avance par rapport à la concurrence internationale. Beaucoup d'ingénieurs-chercheurs du CNET partent dans des services éloignés de la R&D. Jean-Claude choisit une autre voie, lui permettant de continuer à pratiquer sa passion pour la recherche et l'enseignement et devient professeur des universités à l'Université de Rennes 1 (ENSSAT-Lannion). Il y crée une formation en télécommunications optique et organise le transfert du département d'optique intégrée du CNET vers l'Université. Il y participe à la création du laboratoire FOTON tout d'abord en dirigeant le Laboratoire d'Optoélectronique, puis pendant 8 années à la direction de l'unité mixte FOTON qui deviendra sous son égide un des fleurons académiques de l'optique française.

Ce beau parcours nous rappelle ces mots d'Einstein: « Inventer c'est penser à côté » mais aussi que le chemin pour qu'une bonne idée soit acceptée peut être long et tortueux mais qu'il vaut toujours la peine d'être parcouru. ●

Philippe Lalanne, co-lauréat du Grand Prix Léon Brillouin de la Société Française d'Optique pour ses contributions théoriques rigoureuses pionnières en nanophotonique et pour la mise à disposition de logiciels pratiques largement utilisés par la communauté académique et industrielle.

La scène se passe lors d'une conférence en nanophotonique à Orlando, Munich, San Diego, ... ou à Cargèse. L'orateur termine sa présentation, une main se lève. Cette question est attendue, espérée, et le silence se fait dans la salle. Quelques politesses en sorte d'introduction et un sourire au coin des lèvres. La question fuse, elle est claire, nette et sans détour et à la fin de l'envoi... elle touche. Un échange vif s'en suit qui apporte un regard complémentaire et enrichit la présentation. Les assidus des grands événements de la nanophotonique auront reconnu Philippe Lalanne, un des deux co-lauréat 2024 du Grand Prix Léon Brillouin de la SFO.

Philippe Lalanne, normalien et agrégé de physique, débute sa carrière par une thèse sous la direction de Pierre Chavel. Soutenue en 1988, la thèse porte sur la réalisation de réseaux neuronaux en optoélectronique, sujet avant-coureur qui disparaîtra des radars quelques années plus tard et pendant deux décennies en réaction à un hype démesuré et qui est revenu en force depuis quelques années. Mais le hype n'est pas le style de Philippe Lalanne. Pour preuve, l'épopée d'un autre de ses apports pionniers réalisé en collaboration avec Pierre Chavel. Il s'agit des systèmes optiques désormais appelés metasurfaces. La comparaison entre ses résultats obtenus en 1999 et ceux publiés, dans une revue prestigieuse par un collègue prestigieux, en 2016, ne laisse pas de doute et place Philippe Lalanne comme pionnier, reconnu, d'un domaine qui pourra aller très loin dans les applications pourvu que le hype ne le survende pas.

Philippe Lalanne est recruté au CNRS en 1989 au sein du Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique.

Mais, avançons, nous n'en sommes qu'à la préhistoire des apports de Philippe Lalanne, un théoricien rigoureux et toujours proche des applications. En 1998, Thomas Ebbesen et collaborateurs réalisent une démonstration expérimentale qui a marqué la communauté scientifique, à juste titre. Il s'agit de la « transmission extraordinaire » à travers des ouvertures sub-longueur d'onde dans un film mince métallique. Ce résultat est emblématique et toujours salué par la communauté, cependant pendant une dizaine d'années, son interprétation physique restait discutée. C'est Philippe Lalanne qui a mis tout le monde d'accord en démontrant en 2008 d'une façon rigoureuse que les plasmons de surface ne constituent qu'une des composantes de cet effet spectaculaire.

La rigueur et la profondeur du sens physique des apports de Philippe Lalanne sont des constantes qui peuvent être illustrées par bien d'autres exemples. Celui de l'application des « modes quasi-normaux » en optique est emblématique. Utilisés dans d'autres disciplines, notamment les trous noirs, les modes quasi-normaux permettent de décrire d'une manière rigoureuse les systèmes ouverts, possédant des pertes et de ce fait des solutions évoluant dans le temps. Pionnier de leur utilisation en optique, Philippe Lalanne est reconnu internationalement pour son application de cette approche rigoureuse en nanophotonique.

On pourrait continuer à égrener d'autres apports scientifiques marquants de Philippe Lalanne. Ceux dans le domaine des cristaux photoniques pour l'optimisation du couplage à des modes lents ou posant les limites à l'augmentation des

indices de groupe pour l'optimisation de l'interaction lumière-matière, illustrent la synthèse rare réussie chez Philippe Lalanne entre le physicien théoricien rigoureux et l'ingénieur qui s'attaque aux problèmes pratiques qui intéressent la communauté.

Cette dualité est également exprimée par sa volonté de faire profiter la communauté des outils numériques qu'il développe avec Jean-Paul Hugonin. RETICOLO permettant de prédire et optimiser le comportement de réseaux optiques en est une illustration emblématique. Ce freeware est très largement utilisé internationalement aussi bien par la communauté académique que par une dizaine d'industriels et non des moindres.

Remarquons enfin que Philippe Lalanne œuvre efficacement à l'animation de notre communauté, notamment par l'intermédiaire du Groupement de Recherches Ondes du CNRS qu'il a dirigé durant 5 ans.

Philippe Lalanne a rejoint en 2011 le Laboratoire Photonique Numérique et Nanosciences de l'Institut d'Optique à Talence. Ses recherches y sont une fois de plus emblématiques. Tel est le cas notamment des études qu'il mène pour la compréhension et l'optimisation du rôle des metasurfaces constituées de milieux désordonnés dans l'émergence de couleurs structurales et de l'iridescence. Question passionnante de recherche fondamentale et dont les retombées applicatives sont multiples. Peut-être aurons-nous bientôt des voitures ou autres engins aux couleurs iridescentes créés par le désordre... ●

Toutes nos félicitations Jean-Claude et Philippe !

Antoine Godard, président entrant,
François Salin, président
Ariel Levenson, président sortant

Entretien croisé avec Jean-Pierre Huignard et Michel Papuchon

Chercheurs au laboratoire central de recherche (LCR) sur des sujets pionniers en optique et photonique.

<https://doi.org/10.1051/photoniq/20412614>



COMMENT EST NÉ

LE LCR - LABORATOIRE CENTRAL DE RECHERCHE ?

Il faut remonter à CSF (Compagnie générale de télégraphie Sans Fil) qui était une entreprise reconnue dans les années 60 comme leader de l'électronique professionnelle dans les domaines radars, l'émission-transmission et la détection des signaux radio-fréquences. L'ancien directeur de CSF avait donné une coloration forte aux activités de recherche du laboratoire. Les premières expériences optiques sont nées de la volonté d'analyser les signaux radars avec l'optique cohérente (le traitement du radar à vision latérale). Dans ce cadre, le laboratoire de CSF avait mené dès les années 65 des travaux originaux sur les sources lasers et en optique non linéaire et holographie. Des premières études et expériences remarquables avaient également été menées sur la propagation optique guidée déjà dans la perspective d'applications aux télécommunications et à la transmission-traitement temps réel du signal radar. CSF et l'entreprise THOMSON qui avait son propre laboratoire de recherche avec une orientation plus appliquée, ont fusionné en 1968 pour donner naissance à TH-CSF LCR (Laboratoire Central de Recherche) situé à Corbeville et proche de l'Université d'Orsay. Sous la Direction du Pr Pierre Aigrain, Dir. Scientifique de TH-CSF, puis Ministre de la Recherche et de Dr Erich Spitz, Dir. du LCR, puis Dir. Scientifique et Technique de TH-CSF, le LCR a toujours bénéficié d'un fort soutien et d'une vision sur le long terme des activités de recherche et en

particulier autour des thèmes de la photonique et de ses applications.

COMMENT ÊTES-VOUS RENTRÉS DANS LE LABORATOIRE ?

Michel Papuchon: Je suis rentré en 1971 comme doctorant après un DEA d'optique quantique situé à l'institut d'optique. Pendant le DEA et au cours de discussions, on a commencé à entendre parler du LCR et des moyens qui y étaient disponibles. Je me suis dit qu'il fallait aller faire une thèse dans ce laboratoire. J'en ai discuté avec le directeur du DEA, Jacques Ducuing, qui allait par ailleurs devenir professeur à l'école polytechnique et directeur du CNRS. C'était un scientifique très reconnu qui avait signé les premiers papiers avec N Bloembergen sur l'optique non linéaire. En entrant au DEA, j'avais eu une interview avec Jacques Ducuing qui avait tout d'abord tenté de me dissuader de suivre ce DEA face à l'exigence requise et du niveau scientifique des enseignements. Mais face à ma motivation, il m'avait finalement accepté dans son DEA. Il m'avait ensuite conseillé, pour ma thèse, de contacter Erich Spitz qui était responsable d'un groupe de recherche Cohérence et Holographie au LCR. Un matin, alors qu'il montait les escaliers de l'Institut pour y donner un cours, je l'ai abordé en lui parlant de mon désir de travailler sur une thèse au LCR. Il m'a dit de venir le voir au laboratoire le lendemain. J'en suis sorti en 1994.

Jean-Pierre Huignard: J'ai été étudiant pendant 3 ans à l'Institut d'Optique dont je suis sorti diplômé Ingénieur en 1968. J'ai ensuite effectué mon service

scientifique au Laboratoire Central de l'Armement à Arcueil pendant un an. Dans ce labo, on nous recommandait de poursuivre en DEA et c'est ainsi que je me suis inscrit au DEA Optique Cohérente et Holographie dirigé à l'Institut d'Optique par Pr S. Lowenthal. C'est d'ailleurs lui qui me conseille de contacter un de ses amis qui était E. Spitz, alors Dir. du Labo d'Optique à TH-CSF LCR! C'est ainsi que j'ai commencé à travailler au LCR en tant qu'ingénieur de recherche sur l'Optique Cohérente.

QUELLES ÉTAIENT LES CONDITIONS DE TRAVAIL AU LABORATOIRE ?

L'ambiance était propice à la recherche, avec des discussions incessantes entre les membres du laboratoire et très stimulantes. Il fallait certes respecter le cadre industriel des recherches et garder en tête les enjeux applicatifs de nos activités pour les besoins de TH-CSF. Un jour, le directeur du laboratoire est venu me voir (MP) et me dit « Michel, il faut arrêter cette manip', ça suffit comme ça », mais avant de partir du labo, il se retourne et me dit, « mais si ça marche, appelez-moi ». Cette anecdote résume bien l'ambiance qui régnait dans les équipes.

QUELS ÉTAIENT LES PRINCIPAUX PROJETS MENÉS AU SEIN DU LCR DANS LES ANNÉES 1970 ?

Au début des années 1970, le stockage d'information vidéo sur un disque était un projet LCR qui a mobilisé le laboratoire durant plusieurs années, quelle

technologie possible pour stocker une heure de vidéo sur un disque ? C'était le début des travaux qui ont conduit à la réalisation du CD à lecture laser. Ces travaux étaient fédérateurs car plusieurs labos du LCR travaillaient sur le projet qui mettait en œuvre des technologies variées, de la mécanique, de l'optique, de l'électronique, sachant que la micro-cuvette sur le disque faisait à cette époque environ 1 micron. L'équipe LCR est parvenue à stocker 1 heure de télévision sur un disque flexible et transparent de 30 cm, ce qui sous cette forme était une première mondiale ! C'était un enregistrement semi-analogique dans lequel la largeur du signal vidéo constituait une micro-cuvette, on était à mi-chemin entre le digital et l'analogique. LCR travaillait sur disque souple, copiable par simple pressage qui tournait à haute vitesse, et qui volait sur coussin d'air sur la platine. LCR avait conçu l'Enregistreur-Lecteur intégrant tous les asservissements de la tête optique avec les codes correcteurs d'erreurs et les premières images vidéo étaient pour l'époque de qualité remarquable. Les concurrents de TH-CSF étaient Philips aux Pays Bas, RCA aux US qui s'étaient positionnés sur une approche par disque rigide. Ce projet s'est terminé dans les années 1975 lorsque LCR est parvenu à réaliser une maquette de laboratoire qui avait été industrialisée par TH Grand Public.

CE LABORATOIRE S'EST PAR LA SUITE TRÈS RAPIDEMENT POSITIONNÉ SUR LES CIRCUITS PHOTONIQUES INTÉGRÉS.

Le projet suivant a porté sur l'optique guidée pour les télécommunications optiques. Nous cherchions à faire l'équivalent des circuits électroniques intégrés, mais à l'échelle optique. Il fallait pour cela inscrire des guides d'onde sur des substrats plans de quelques microns de large et sur plusieurs centimètres de longueur. Nous cherchions à créer des fonctions optiques, comme le multiplexage/démultiplexage, commutation & modulation. Nous avons accès à beaucoup de moyens en fabrication, caractérisation et nous cherchions dès les années 1971

à créer des modulateurs et commutateurs optiques. Plusieurs équipes étaient impliquées dans le projet plus général des télécommunications optiques, notamment une équipe qui fabriquait des fibres optiques, une autre qui étudiait les systèmes de transmission optique, un labo d'optique intégrée, et également un labo de traitement du signal. Nous bénéficions de plus d'un environnement technologique incroyable. (MP) Ma thèse que j'ai démarrée en 1971 en intégrant une petite équipe dirigée par D.B. Ostrowsky portait sur ce sujet des circuits photoniques intégrés. Je l'ai soutenue en 1975. La difficulté principale était de concevoir des circuits monomodes de quelques microns carrés. Nous avons suivi plusieurs techniques pour fabriquer les guides, mais celle qui a donné le meilleur résultat était celle basée sur le niobate de lithium ou le tantalate de lithium où nous faisons diffuser des ions titane pour augmenter l'indice de réfraction. À l'aide des masques réalisés avec un masqueur à faisceau d'électrons développé pour la microélectronique dans un autre groupe du laboratoire, nous avons pu développer de la lithographie optique et travailler sur des masques de $5 \times 5 \text{ cm}^2$. Nous sommes parvenus à réaliser des matrices de commutateurs. Le niobate avait à cette époque des défauts, comme des pertes, de la rugosité. Mais ce matériau avait attiré notre intérêt par son effet électro-optique. Sa température de Curie était élevée, de l'ordre de 1100°C , et la diffusion des ions Ti s'effectuait à température plus basse, ce qui n'engendrait pas de modification notable du matériau.

COMMENT AVEZ-VOUS ABORDÉ LA THÉMATIQUE DE L'OPTIQUE NON-LINÉAIRE ?

MP : Nous nous sommes au départ intéressés au non-linéaire suite à l'apparition des disques à lecture laser qui fonctionnaient autour de $0.8 \mu\text{m}$. Nous cherchions à doubler la fréquence des lasers à semi-conducteurs qui émettaient à $0.8 \mu\text{m}$ pour limiter la diffraction et donc, en conséquence, doubler la capacité de stockage des disques. Nous cherchions à aller dans le bleu, comme

le blue-ray actuel. On nous répondait à l'époque que les semi-conducteurs seraient rapidement capables d'émettre du bleu, mais l'histoire montrera qu'il faudra attendre les années 1980 pour que Shuji Nakamura y parvienne, ce qui lui vaudra le prix Nobel de Physique 2014. Nous avons travaillé sur ce sujet en nous concentrant sur l'inversion périodique des orientations de la polarisation ferroélectrique du matériau (quasi accord de phase). La difficulté était d'appliquer un champ électrique statique à haute température pour forcer la polarité à se retourner.

AVEZ-VOUS TRAVAILLÉ SUR LES SOURCES DE LUMIÈRE ?

Oui, car nous cherchions à parvenir à une intégration totale source/fonction optique/détection sur la même puce photonique. Nous nous sommes concentrés soit sur des matériaux comme le niobate de lithium dopé (avec du Néodyme par exemple) soit sur les lasers à semi-conducteurs du type GaAs ou InGaAs plus simples à intégrer aux circuits. Nous travaillions sur les concepts d'onde, de modes, et en interagissant avec l'équipe de croissance de semi-conducteurs qui était capable de faire croître des couches très minces de semi-conducteur pour obtenir des puits de potentiels dans ces matériaux. L'idée suivante a commencé à germer: si nous étions capables de contrôler l'épaisseur, nous serions capables de contrôler la distance entre les niveaux d'énergie de ces puits de potentiels pour concevoir des matériaux absorbants à des fréquences données. En d'autres mots, nous serions capables de fabriquer des matériaux absorbants en couches minces en créant des puits quantiques, mais à partir de matériaux transparents en substrat. Ces travaux donneront les capteurs infra-rouges que nous trouvons aujourd'hui dans les caméras infra-rouges. Pierre Aigrain, le directeur Technique de Thomson CSF (considéré comme l'inventeur du laser à semi-conducteur) et son successeur E. Spitz avaient tous les deux une vision claire des projets scientifiques à mener. Ces ●●●

personnes constituaient une véritable force d'entraînement pour les équipes du laboratoire.

AVEZ-VOUS ABORDÉ LES ASPECTS DE DIFFRACTION ET DE CONTRÔLE DES ONDES ?

JPH. J'ai été dès le début de mes activités au LCR impliqué sur plusieurs sujets tels que des réalisations de composants diffractifs pour la vision tête haute TH-CSF, le traitement et le contrôle optique de fronts d'ondes et l'enregistrement holographique de données. Un des objectifs était de manipuler les propriétés spatio-temporelles amplitude-phase de l'onde, en exploitant les variations d'indice photo-induites dans certains cristaux de l'optique non linéaire pour l'holographie dynamique de phase dans le volume du cristal. Ces techniques de mélange cohérent des ondes signal et référence permettaient aussi la génération de nouveaux fronts d'ondes, en particulier les ondes conjuguées, avec des propriétés remarquables de compensation des distorsions de phase au cours de la propagation de l'onde dans des milieux aberrants statiques ou dynamiques. Nous avons également beaucoup travaillé sur de premiers modulateurs spatiaux à base de cristaux liquides. Un laboratoire au LCR était dédié à l'étude et au développement des cristaux liquides dans la perspective de réaliser des écrans plats TV. Ainsi les premiers écrans, modulateurs spatiaux avec plusieurs dizaines de pixels, qui fonctionnaient déjà par adressage lignes-colonnes ont permis de multiplexer par holographie de volume plusieurs images dans un cristal de Niobate de Lithium. Ces classes de cristaux à variations d'indice photo-induites sont connues aujourd'hui comme matériaux photo-réfractifs. Il fallait plusieurs dizaines de secondes pour imprimer les variations d'indice jusqu'à saturation. C'était suffisant pour démontrer les principes mais insuffisant pour envisager des applications. C'est ce qui nous a conduit avec François Micheron, spécialiste matériaux au LCR, à rechercher d'autres matériaux et nous sommes tombés sur la classe des cristaux EO et photoconducteurs Bi₁₂SiO₂₀ dits BSO.

Enorme surprise, l'expérience sur un coin de table nous fait gagner 3 ordres de grandeurs sur les temps de réponse référence du Niobate !! L'hologramme s'inscrivait et s'effaçait en 10 millisecondes avec un faisceau laser vert de 10mW/cm². Des changements considérables... nous avons pu refaire avec ce cristal dynamique toutes les expériences menées par le passé : l'interférométrie, la vibrométrie Doppler, corrélation optique dynamique avec écrans cristaux liquides pour traiter les images en temps réel et à cadence vidéo... Le processeur réalisé visait déjà à exploiter le parallélisme de l'optique et la capacité du traitement numérique pour le calcul de filtres complexes et aussi la reconnaissance d'objets par réseaux de neurones. Le cristal répondait toujours en quelques ms avec des puissances laser faibles, et de plus nous avons identifié les conditions de haute efficacité en régime de réseau mobile sous champ appliqué et décalage de fréquence de l'onde référence. Ces résultats ont connu de fortes retombées et ont stimulé de nombreuses autres expériences dans plusieurs laboratoires, menées notamment dans l'infrarouge proche avec du GaAs.

COMMENT AVEZ-VOUS ÉTÉ AMENÉ À TRAVAILLER SUR LA MANIPULATION ET CORRECTION DE FRONT D'ONDE ?

Les applications Laser pour Lidar et focalisation sur cible étant déjà identifiées par TH-CSF, il était donc important d'assurer le contrôle de la phase et de l'amplification cohérente de l'onde laser tant à l'émission qu'après propagation espace libre. Dans ce cadre l'expérience acquise sur l'holographie dynamique a permis de réaliser l'amplification paramétrique des fronts d'ondes avec gain élevé x10-100 par couplage entre les ondes signal et référence. Également, la génération d'onde conjuguée dans les cristaux photoréfractifs et aussi dans le milieu laser pompé par diodes. Ces expériences ont conduit à de belles démonstrations avec des cavités auto-induites qui se corrigent de leurs distorsions de phase et aussi en propagation espace

libre après réflexion sur le miroir conjugué non linéaire.

QUELLES AUTRES TECHNOLOGIES ONT ÉTÉ DÉVELOPPÉES AU LCR ?

Un sujet important également pour les besoins optroniques Lidar était le contrôle de déflexion angulaire - focalisation du faisceau et bien entendu il fallait s'inspirer des techniques de réseau phasé déjà mises en œuvre par nos collègues radaristes... Nous avons exploité ces principes avec des modulateurs spatiaux à cristaux liquides qui assurent facilement le déphasage 0-2pi sur une très faible épaisseur, avec adressage du modulateur spatial par électrodes ou bien par adressage optique *via* une image projetée sur le photoconducteur BSO... certainement la première démonstration de principe d'antenne à balayage fonctionnant dans l'infrarouge à 10.6 μm... mais ces résultats sont restés confidentiels à l'époque ! Un autre succès apprécié a été le choix de la technologie LCR de modulateur spatial adressé optiquement BSO-CL pour le contrôle spatial de phase au niveau de chaque module avant amplification dans la chaîne Laser Fusion - NIF de LLNL aux US. Selon nos informations, ce composant a donc contribué aux récents résultats du NIF en fusion laser !

En ce qui concerne les nouveaux composants passifs issus des micro-nanotechnologies, le LCR avait dès 1996 réalisé par photolithographie UV des composants 2D sur GaAs exploitant la notion d'indice effectif résultant de la répartition spatiale de piliers sub-longueur d'onde. On réalisait ainsi pour l'IR sur substrat SC de toutes premières fonctions de type structure antiréfléchissante, prisme ou lentille de grande efficacité et que l'on appelle aujourd'hui métasurface ou bien métalens... et destinées aux besoins des applications optroniques.

Enfin un autre sujet qui a fait l'objet dès les années 80 d'une attention toute particulière compte tenu des métiers TH-CSF puis THALES est celui de l'optique hyperfréquence. Des liaisons

fibres propageant avec faible perte le signal hyper sur porteuse optique ont fait l'objet de nombreux travaux au LCR pour satisfaire aux paramètres critiques des liaisons RF. Le laboratoire a apporté sur ce thème des approches originales à la génération de formes d'ondes hyper, en particulier valider les principes de commande optique d'antennes RF fonctionnant en large bande c'est-à-dire contrôle du retard-phase de chaque élément rayonnant. Encore une fois les modulateurs spatiaux CL ont apporté des solutions originales : le contrôle de polarisation et la mise en cascade de N modulateurs spatiaux permettant d'afficher retard et phase pour le signal RF rayonné et compatible avec balayage large bande du faisceau émis par l'antenne.

Le LCR avait une forte activité sur la physique et technologie des semi-conducteurs pour l'électronique et l'optoélectronique : Si mais surtout GaAs, InP, GaN... et disposait de tous les moyens d'épitaxie pour la réalisation : émetteurs – détecteurs – puits quantiques – lasers à cascade Q... lasers SC de puissance et de très beaux résultats sur tous ces sujets. Enfin, il faut mentionner les travaux d'Hervé Lefevre et Hervé Arditty sur les gyromètres optiques à fibre. C'est à Université de Stanford qu'ils avaient effectué des premières expériences sur des gyromètres à fibre et ils ont été recrutés au laboratoire pour développer ce thème de recherche au LCR.

COMMENT EXPLIQUEZ-VOUS QUE CES TRAVAUX APPARAISSENT AUJOURD'HUI COMME SI NOVATEURS ET PIONNIERS ?

Sous l'impulsion de sa Direction scientifique, chacun de nous au LCR a été encouragé à prendre toute initiative consistant à valider par l'expérience une grande diversité de concepts innovants qui devaient répondre à l'évolution des besoins des Divisions de TH-CSF. Ces Divisions couvraient des métiers aussi variés que les télécommunications, les liaisons hyperfréquences et radars, l'aéronautique, l'optronique, acoustique

sous-marine, le grand public... et chacun de ces métiers intègre aujourd'hui des composants et technologies photoniques qui sont incontournables pour le gain de performances des grands systèmes. Egalement le LCR avait su établir très tôt dès les années 70, des relations avec les grands laboratoires US tels que Bell Labs, RCA, Hughes Research, et des labos universitaires comme MIT, Stanford, Caltech... qui avaient développé une culture de l'innovation sur tous les aspects de la recherche Optique-Laser issue des premières sources cohérentes. Le LCR se posait même en concurrent de ces labos !

JUSQU'À QUAND AVEZ-VOUS TRAVAILLÉ AU LCR ?

MP : J'y suis resté jusqu'en 1994, année où je suis parti travailler à Thales Optronique (TOSA), dont un des directeurs était François Micheron, un ancien du LCR. J'ai pris ma retraite en 2008.

JP H : J'y ai fait toute ma carrière et j'y suis resté jusqu'à ma retraite en fin 2009. Actuellement l'Institut Langevin m'accueille à temps partiel. Je tiens à remercier son Dir Y. De Wilde, F. Ramaz et son équipe... on y retrouve l'esprit du LCR, sur des thèmes comme l'imagerie cohérente dans des milieux multidiffusants pour applications biophotoniques.

REMERCIEMENTS : JPH ET MP

MP et JPH souhaitent remercier tous les membres de leurs laboratoires pour les formidables moments de créativité vécus avec eux au LCR et dont la coopération enthousiaste et les résultats obtenus ont souvent conduit à des recherches innovantes du plus haut niveau. Chacun reconnaîtra dans cet article sa contribution aux thèmes de recherche de cette époque du LCR-Corbeville qui ont pleinement contribué aux développements actuels de la Photonique. ●



**Votre partenaire pour
l'optique de précision et
pour vos systèmes optiques.**

SPECTROS SA 4107 Ettingen Suisse Tel.+41 61 726 20 20

**HAAG-STREIT
SPECTROS**

www.spectros.ch

Look closer. See further.



Témoignage d'entrepreneur Pierre Potet

Entrepreneur, directeur de New Imaging Technologies, entreprise spécialisée dans la conception de caméras SWIR.

POUVEZ-VOUS PRÉSENTER VOTRE PARCOURS ?

Je suis ingénieur de formation, diplômé de l'UTT Compiègne. J'ai poursuivi ma formation par une thèse de doctorat dans un laboratoire de la DGA. Ma thèse portait sur la thermographie infrarouge pour le contrôle non destructif de pièces mécaniques. C'est à cette époque que j'ai découvert le spectre infrarouge et les problématiques liées à l'imagerie IR.

VOUS AVEZ RAPIDEMENT ÉTÉ ATTIRÉ PAR LE MONDE DE L'ENTREPRENARIAT

Oui, j'ai créé ma première entreprise, CEDIP Infrared Systems, en 1989. Nous fabriquons des caméras infrarouges. L'entreprise s'est développée et en 2006, j'ai fait une introduction en bourse sur le marché français. En 2009, nous avons reçu une offre très intéressante de FLIR qui a racheté CEDIP.

COMMENT AVEZ-VOUS PRIS LA DIRECTION DE NIT ?

Mon associé, un ancien chercheur du laboratoire, avait créé NIT en 2008 comme une spin off de l'institut national des télécoms, et il cherchait un associé et des investisseurs. J'ai investi et j'ai fait venir des fonds d'investissement entre 2009 et 2014. J'ai pris la direction de l'entreprise dès mon arrivée ensuite mon associé fondateur l'a quitté en 2019 pour s'investir dans sa carrière académique.

QUEL EST LE CŒUR D'EXPERTISE DE NEW IMAGING TECHNOLOGIES ?

Notre cœur d'expertise se situe dans le développement de caméras infrarouges basées sur des capteurs CMOS/InGaAs. Nous faisons fabriquer les circuits silicium en Asie et nous avons investi il y a 2 ans pour l'assemblage, les câblages.

Nous concevons les circuits de lecture CMOS, les rétines IR à partir de matériaux III-V InGaAs, et nous les assemblons pour développer des caméras que nous commercialisons.

COMMENT S'EST DÉVELOPPÉE L'ENTREPRISE DEPUIS SA CRÉATION ?

Dans une première phase que nous pouvons situer entre 2008 et 2014, nous avons tout d'abord beaucoup investi en recherche et développement. Nous parvenions à générer un chiffre d'affaire de 2M€ mais l'entreprise n'était pas rentable car nous investissions beaucoup dans la R&D. C'est pourquoi j'ai fait appel à des investisseurs jusqu'en 2014. Une deuxième étape très importante a été notre transition vers l'infrarouge en 2016. Nous sommes aujourd'hui spécialisés dans le SWIR. Nous sommes depuis 4 ans sur une dynamique très favorable avec une croissance à 2 chiffres et surtout une rentabilité solide avec un chiffre d'affaires attendu de 6.5M€ pour 2024.

QUELS SONT VOS PRINCIPAUX MARCHÉS ?

Nous avons des marchés assez diversifiés mais la défense reste le domaine applicatif principal de nos produits, surtout dans le contexte géopolitique actuel. La vision industrielle est également un marché important, et enfin un troisième secteur clé pour nous est celui des télécoms.

COMBIEN DE PERSONNES TRAVAILLENT AUJOURD'HUI DANS L'ENTREPRISE ?

La société comprend 30 collaborateurs. Nos locaux sont situés à Verrières-le-Buisson. J'aimerais que l'entreprise croisse encore afin de devenir encore plus solide. Pour cela, nous devons

identifier des marchés clés et travailler encore notre rentabilité.

COMMENT ABORDEZ-VOUS LES PROCHAINES ANNÉES ? QUELS SONT LES SECTEURS EN CROISSANCE ?

Je vois toujours de la croissance, au moins pour les 3 prochaines années, car je vois la demande qui augmente continuellement. Les secteurs les plus dynamiques actuellement sont la machine vision pour du contrôle qualité sur les chaînes de production. Un marché important dans ce secteur est celui du contrôle optique des semi-conducteurs pour les panneaux photovoltaïques. La défense est un secteur en pleine croissance et nos produits trouvent des applications par exemple pour de l'imagerie à très longue portée ou l'imagerie des lasers. Le domaine de l'environnement, et en ce qui nous concerne du tri optique, est aussi en forte croissance.

AVEZ-VOUS DES COLLABORATIONS AVEC DES LABORATOIRES ACADÉMIQUES ?

Oui, nous travaillons sur la réalisation de détecteurs à base de nanocristaux à boîte quantique avec l'INSP depuis plusieurs années. La technologie développée est très prometteuse et nous espérons développer des caméras basées sur ces nouveaux capteurs dans une vision de 3 à 5 ans.

CONTINUEZ-VOUS À INVESTIR DANS LA R&D ?

L'imagerie SWIR est un secteur qui évolue rapidement avec des sauts technologiques fréquents. Dans ce contexte, la R&D est vitale pour nous maintenir dans ce secteur et c'est pourquoi nous investissons chaque année ~1M€ dans la R&D. ●

La Commission internationale d'optique

le lieu de rencontre du monde de l'Optique



Initiée au sortir de la 2^e guerre mondiale pour rassembler une communauté de chercheurs en optique en Europe et aux Etats-Unis, la Commission Internationale d'Optique représente actuellement plus de 50 pays répartis sur les 5 continents. Elle fonctionne avec un bureau de 13 membres élus tous les 3 ans par les comités territoriaux des pays membres dont la SFO fait partie, et de 8 représentants d'autres sociétés savantes internationales, avec lesquelles elle mène de nombreuses actions. De nos jours, elle s'attache particulièrement à promouvoir l'Optique dans les pays en développement, notamment au travers de plusieurs prix qu'elle décerne et d'actions qu'elle soutient.

<https://doi.org/10.1051/photon/202412619>

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.

Nathalie WESTBROOK*, Vice-présidente de l'ICO
 Université Paris-Saclay, Institut d'Optique Graduate School,
 CNRS, Laboratoire Charles Fabry, Palaiseau, France
 * nathalie.westbrook@institutoptique.fr

Origine de cette commission internationale d'optique et liens avec la SFO

Les prémices de sa création remontent à 1946 et une réunion internationale des Opticiens à Paris initiée par Pierre Fleury, le 2^e directeur de l'Institut d'Optique après Charles Fabry, pour créer une communauté scientifique après la seconde guerre mondiale.

La création sera actée l'année suivante à Delft lors du premier congrès de l'ICO, avec des membres européens mais aussi les États-Unis. Les membres en sont des comités territoriaux, dont le comité Français d'Optique qui sera plus tard remplacé par la SFO lors de sa création en 1983. La participation des États-Unis dès le début contribuera à en faire une société non uniquement européenne, mais à vocation résolument internationale. A ce jour, l'ICO comporte des comités territoriaux représentant 53 pays sur les 5 continents ! Notons que Pierre Chavel qui en a été le secrétaire général pendant 12 ans (1991-2002) et le conseiller jusqu'en 2008, a beaucoup œuvré pour augmenter le nombre de pays membres, qui est passé de 38 à 51 sous son mandat. D'autres membres de la SFO ont été ou sont encore actifs à l'ICO : Hervé Lefèvre élu vice-président de 2005 à 2011, John Dudley membre du comité éditorial de la newsletter depuis 2008, Gilles Pauliat vice-président représentant l'EOS depuis 2021. Une spécificité de l'ICO est que son congrès trisannuel se déplace à travers le monde, il a déjà eu lieu dans 17 pays différents.

La 26^e édition se déroulera pour la première fois sur le continent africain, à Capetown en Afrique du Sud, du 21 au 24 octobre 2024. La tenue d'un tel congrès en Afrique avait initialement été poussée dès 2021 avec une proposition conjointe d'Ahmadou Wagué du réseau LAM (African Laser Atomic Molecular and Optical Sciences Network) et de Gilles Pauliat (alors président de l'EOS), avec le soutien de la SFO pour organiser ce congrès à Dakar au Sénégal. La localisation a finalement été modifiée début 2024 tout en maintenant le souhait collectif de l'ICO de tenir ce congrès en ●●●

Afrique. La volonté du président actuel de l'ICO, John Howell (Univ. Chapman, USA), est de mettre l'accent sur des actions à destination de l'Afrique en préparation de cet événement.

Position de l'ICO par rapport aux sociétés savantes comme Optica, SPIE ou EOS, et liens avec l'ICTP

On l'a vu, l'ICO a une couverture géographique très large, et ses comités territoriaux membres sont des sociétés savantes nationales dans les pays où une telle structure existe. De plus, des sociétés regroupant plusieurs pays en sont également membres, ainsi d'OSA devenue Optica en 2021, de SPIE, de la division Photonics d'IEEE et de l'EOS mais aussi des réseaux géographiques comme le LAM en Afrique ou le RIAO (Ibéro-American Network for Optics) en Amérique Latine, et un réseau thématique OWLS (Optics With Life Sciences). Ne comportant pas de membres individuels et n'éditant aucune revue scientifique, son budget est beaucoup plus limité que certaines de ses sociétés membres, mais elle contribue à fédérer les actions, en particulier vers les pays en développement. Dans cet esprit, l'ICO est aussi depuis longtemps associée au Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP), basé à Trieste, et a créé avec lui une série d'écoles d'hiver (Winter School on Optics), associées à un laboratoire expérimental en Optique, permettant d'accueillir et de former des étudiants et jeunes chercheurs issus de pays en développement. Un comité scientifique commun, le Trieste System Optical Sciences and Applications Advisory group (TSOSA), définit les thèmes à mettre en avant pour ces écoles. Après une interruption liée au COVID, et une édition en virtuel en 2022 sur le LIDAR et ses applications, une école sur le thème de la Photonique TéraHertz a eu lieu pour 2 semaines en février 2023. Le prix ICO/ICTP Gallieno Denardo est également issu de cette collaboration, et je le préside depuis 2021 conjointement avec Joe Niemela, à la fois trésorier de l'ICO et directeur du centre ICTP de Trieste. Ce prix a permis de récompenser des chercheurs et chercheuses en optique de moins de 40 ans exerçant au Pakistan, en Arménie, en Inde, en Malaisie ou en Argentine pour ne citer que quelques lauréats récents.



Figure 1. Réunion des opticiens à Paris en 1946, prémices de la création de l'ICO.

Principales actions de l'ICO : les prix et le soutien à la formation

Parmi ses actions phares, outre le prix Gallieno Denardo commun avec l'ICTP, l'ICO délivre plusieurs autres prix : en propre, comme le prix international d'optique de l'ICO et la médaille Galileo Galilei, ou conjointement comme le prix pour jeune scientifique en optique commun avec l'IUPAP (International Union of Pure and Applied Physics). Outre une dotation financière, ces prix sont accompagnés d'une invitation à un congrès parrainé par l'ICO. Le prix de l'ICO vise à encourager une ou un chercheur de moins de 40 ans pour la suite de sa carrière, et on peut citer quelques lauréats comme Alain Aspect en 1987 ou Stefan Hell en 2000, qui ont effectivement poursuivi brillamment. La médaille Galileo Galilei, créée en 1994, récompense les travaux d'une personne ayant contribué au rayonnement de

Figure 2. Carte des membres et des lieux de congrès

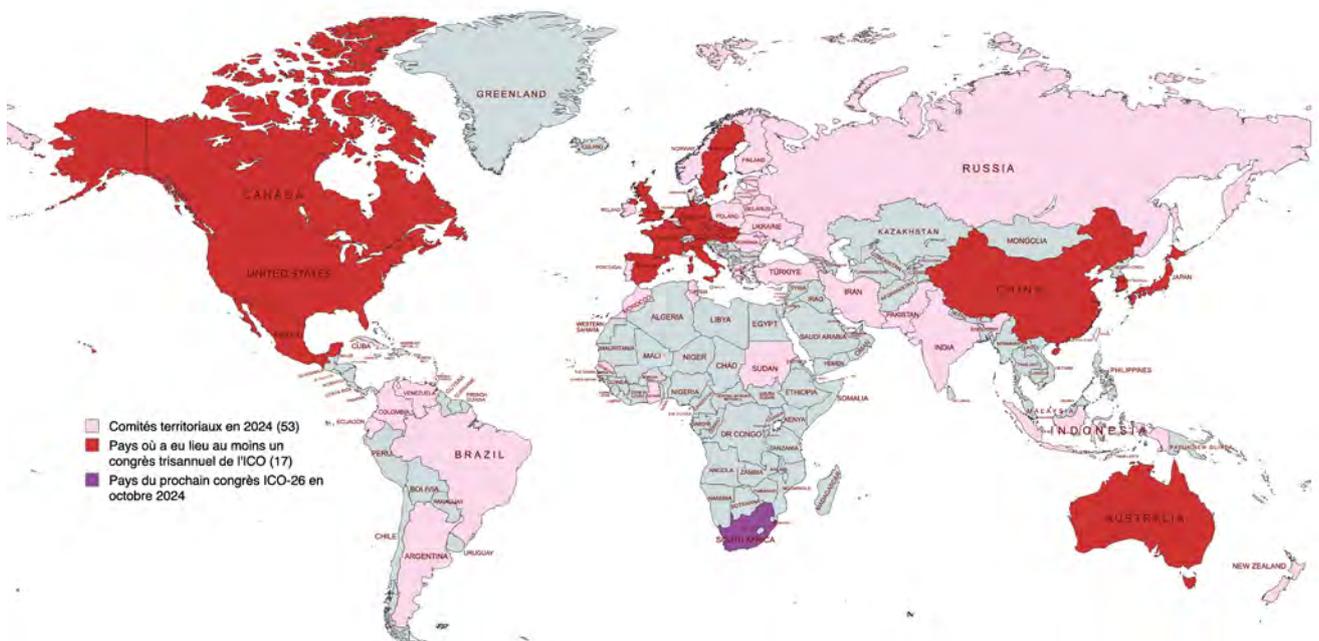




Figure 3. Bureau de l'ICO à ICO-25 à Dresde en septembre 2022
(Crédit Photo : J. Czarske)

l'optique dans des circonstances difficiles, ainsi de chercheurs du Bangladesh, d'Inde, de Russie, du Mexique, d'Afrique du Sud ou d'Ukraine pour citer quelques exemples récents. Enfin le prix commun avec l'IUPAP s'adresse à des opticiens et opticiennes ayant au maximum 8 ans d'expérience post-thèse. A noter qu'un effort vers plus de parité reste à faire parmi les lauréats de ces prix, même si ceux communs avec l'IUPAP (27% de femmes lauréates) et l'ICTP (19%) sont meilleurs que les autres sur ce point.

En plus de son congrès trisannuel évoqué plus haut, l'ICO soutient l'organisation de colloques thématiques en optique plus locaux, notamment dans des pays où ce type d'évènement est moins fréquent. Ainsi du premier congrès international d'Optique organisé à Dakar en 1998, du congrès RIAO/Optilas au Costa Rica en mars 2023, ou du congrès Optics and Photonics in Africa organisé en Afrique du Sud en novembre 2023. Ces congrès sont importants pour faciliter l'accès des étudiants et chercheurs locaux à des conférences internationales. Ceci était particulièrement vrai en novembre dernier où de nombreux étudiants sud-africains de master et de thèse participaient à la conférence, et où des activités communes entre chercheurs confirmés et étudiants étaient organisées, scientifiques et sociales.

Dans le domaine de la formation, outre le Winter College in Optics à Trieste, l'ICO et ses associations membres ont initié en 1991 à St Pétersbourg des conférences internationales bisannuelles pour enseignants intitulées « Education and Training in Optics and Photonics (ETOP) ». Quinze éditions ont eu lieu dans une grande variété de pays, la plus récente en 2021 ayant dû basculer en distanciel. L'ICO soutient également des actions de formation au bénéfice des pays en développement, souvent en lien avec ses associations membres comme Optica, SPIE ou IEEE, parfois avec le soutien d'entreprises. Ainsi Dr Imrana Ashraf de l'Université Quaid-i-Azam au Pakistan, lauréate du prix Gallieno Denardo en 2004, développe de nombreuses actions de formation avec des kits expérimentaux (dont certains fournis par Thorlabs avec l'aide de l'ICO), à destination aussi bien de collégiennes pakistanaïses que d'étudiants d'Université

dans le cadre de l'action Active Learning in Optics (voir par exemple la newsletter de l'ICO de janvier 2023).

Depuis la constitution du nouveau bureau de l'ICO en 2021, un groupe de travail associant des membres du bureau de l'ICO et des enseignants-chercheurs africains en optique a été mis en place pour développer des actions, en s'inspirant notamment d'actions des sociétés membres comme le programme IEEE SIGHT (Special Interest Group on Humanitarian Technology) (voir Newsletter ICO de janvier 2022). Une synergie avec les actions de la Commission SFP-SFO Physique et Optique sans Frontières a été évoquée lors d'une discussion récente avec François Piuze.

Conclusion

Pour terminer, mentionnons l'évolution récente du statut de l'ICO qui est devenue membre à part entière (dit de catégorie 1) de l'International Science Council et non plus une division disciplinaire de l'IUPAP, reconnaissant ainsi l'Optique non seulement comme une composante de la physique, mais aussi comme une discipline transverse intervenant dans beaucoup de domaines différents, notamment l'énergie, la communication ou la santé. L'optique, par ses possibilités de miniaturisation et de développement de composants bas coût au travers des smartphones, des LEDS ou des cellules photovoltaïques, se prête particulièrement bien à un accès expérimental à un large public, aussi bien dans nos écoles que dans les laboratoires du monde entier et l'ICO est un lieu de rencontre de ces opportunités. De plus, à l'heure où les revues et conférences prédatrices sont légion, la crédibilité scientifique reconnue des sociétés savantes est d'autant plus précieuse. Alors, n'hésitez plus et contribuez vous aussi à la vie de l'ICO : participez à son prochain congrès en Afrique du Sud où vous découvrirez le dynamisme de la recherche en optique dans ce pays et dans le reste du continent africain, contribuez à ses actions de formation, et proposez des candidates et candidats pour ses différents prix, afin d'encourager vous aussi le développement de l'optique dans le monde entier. ●

Figure 4. Optics and Photonics in Africa, White River, South Africa, nov 2023 (crédit photo: N. Westbrook)



Le laser Megajoule

Jérôme NEAUPORT*, Sebastien VERMERSCH

CEA CESTA, Le Barp, F-33116, France

* jerome.neauport@cea.fr



Interaction laser/cible lors de la campagne laser QPerf2023 (©CEA/E.Journot-E. Chatillon)

Dédié à l'étude des plasmas denses et chauds au sein du programme de Simulation du CEADAM, le laser Mégajoule est actuellement l'un des lasers les plus énergétiques du monde. Après la mise en route d'une première chaîne laser en 2014, il comprend aujourd'hui 11 chaînes lasers (soit 88 faisceaux lasers) délivrant quotidiennement jusqu'à 330 kJ d'énergie sur cible à la longueur d'onde de 351 nm. Nous décrivons le système laser LMJ, les performances atteintes dans sa configuration actuelle, ainsi que les campagnes lasers conduites pour amener l'installation à une énergie de 1.3 MJ, une fois les 22 chaînes lasers montées et qualifiées.

<https://doi.org/10.1051/photon/20412622>

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.

Le Laser MegaJoule (LMJ) est une installation laser de puissance dimensionnée pour l'étude de la Fusion par Confinement Inertiel (FCI) par l'interaction de faisceaux lasers avec une cible constituée d'une bille de deutérium-tritium (D-T) localisée dans une cavité en or et placée au centre d'une chambre sous vide de 10 m de diamètre. Cette configuration expérimentale de FCI est dite d'attaque indirecte, la compression de la bille de D-T se faisant sous l'effet des rayons X générés par l'interaction des faisceaux lasers avec la paroi d'or. L'installation laser délivrera jusqu'à 1.3 MJ d'énergie et 400 TW de puissance sur cible à la longueur d'onde de 351 nm, pour des impulsions d'une durée comprise entre 1 et 20 ns.

Cette énergie/puissance est fournie par 22 chaînes lasers, constituées de 8 faisceaux lasers de $35 \times 35 \text{ cm}^2$ de section, soit 176 faisceaux lasers. Une chaîne additionnelle, PETAL (PETawatt Aquitaine Laser), financée par le Conseil Régional de Nouvelle Aquitaine et par des fonds Européen (FEDER), ouverte à la communauté académique, ajoute une capacité ultra haute intensité de classe Petawatt à ce système expérimental. Après une phase de conception menée à la fin des années 1990, un premier prototype de chaîne laser de 8 faisceaux (LIL : Ligne d'Intégration Laser) a été mis en service en 2002 pour en valider les choix de concept. La LIL a été exploitée à des fins expérimentales jusqu'en 2014. La mise en service de la

première chaîne laser du LMJ survint en 2014 dans un bâtiment nouvellement construit et comprenant 4 halls de 128 m de long disposés autour de la chambre d'expérience. Dès lors, l'installation LMJ a été utilisée pour des campagnes d'expériences sur cible, tout en poursuivant les activités de montage des chaînes lasers additionnelles. L'énergie et la puissance par faisceau est depuis le démarrage de l'installation limitée de moitié (3.75 kJ / 1.25 TW par faisceau à 351 nm) dans le but de réduire l'endommagement des optiques de fin de chaîne fonctionnant à la longueur d'onde de 351 nm. Il s'agit notamment de limiter les opérations de maintenance dans une phase où le montage de chaînes additionnelles se poursuit. Aujourd'hui,

11 chaînes lasers (88 faisceaux) sont quotidiennement utilisées en campagnes expérimentales sur cible, 18 chaînes lasers sont assemblées dont 15 sont qualifiées, soit 120 faisceaux laser. Depuis sa mise en service il y a 10 ans, plus de 400 tirs de campagnes d'expériences sur cible ont été réalisés explorant une grande variété de domaines de la physique des hautes densités d'énergie.

Principe de fonctionnement

L'impulsion laser est générée dans un oscillateur Yb fibré à la longueur d'onde de 1053 nm (appelée 1ω). 4 oscillateurs situés respectivement dans les 4 halls lasers délivrent une impulsion synchrone d'environ 1 nJ. Ces impulsions sont distribuées vers 44 systèmes de mise en forme temporelle (un par quadruplet laser). Chacun d'eux adresse alors deux Modules de Preamplification (MPA). Le MPA amplifie l'impulsion jusqu'à 1 joule sur une section de $4 \times 4 \text{ cm}^2$ dans une architecture comprenant un amplificateur régénératif et un amplificateur à 4 passages. Il est également équipé d'une mise en forme spatiale permettant de réduire les modulations spatiales basse fréquence du faisceau laser au voisinage des optiques fonctionnant à 351 nm. Chaque MPA est ensuite distribué vers deux faisceaux de l'amplificateur principal (Figure 1). Le faisceau subit alors un grandissement de 9.5 après passage d'une lentille de filtrage (L3) pour atteindre une section de $35 \times 35 \text{ cm}^2$. L'amplification se fait grâce à 16 plaques de verre laser néodyme phosphate pompées par flash. Ces plaques sont réparties dans deux structures amplificatrices de 8 faisceaux lasers (une chaîne) regroupant respectivement 9 et 7 plaques par faisceau. Ces amplificateurs sont séparés par deux filtrages spatiaux (FSC constitué de deux lentilles L1 et L2 de 10 m de focale, et FST comprenant deux lentilles L3 et L4 de 26 m de focale). Leur rôle est de nettoyer

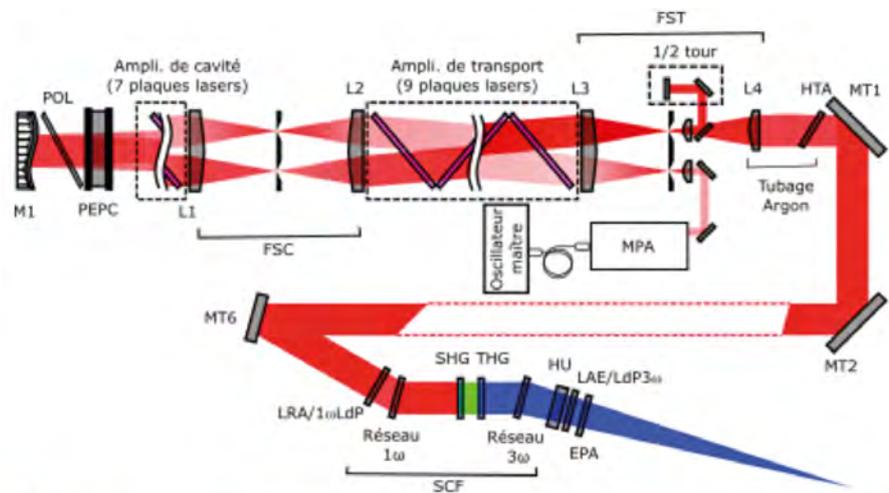


Figure 1. Description du schéma optique d'un faisceau élémentaire du LMJ, 2 passages sur 4 dans les amplificateurs sont représentés par souci de simplification (haut). Vue de dessus d'un des quatre halls du LMJ équipés de 5 chaînes (© CEA/ E. Journot) (bas).

le faisceau laser des modulations millimétriques dont l'amplification par effet Kerr pourrait endommager les composants optiques. 4 passages successifs sont réalisés dans ces amplificateurs grâce à un multiplexage angulaire et un demi-tour. Un système d'isolation optique comprenant une cellule de Pockels à électrode de plasma (PEPC) et un polariseur (POL) bloque tout passage de faisceau parasite potentiel après le quatrième passage de l'impulsion amplifiée. Un miroir déformable (M1) permet de compenser les aberrations thermiques des composants optiques de la section amplificatrice. A l'issue de ce trajet, le faisceau est amplifié jusqu'à une énergie pouvant atteindre 20 kJ. Les faisceaux lasers sont alors dirigés par quadruplet (2×2 faisceaux lasers) autour de la chambre d'expérience dans le but d'obtenir une géométrie sphérique uniforme distribuée suivant 4 cônes principaux (33.2° , 49° , 131° ,

146.8°) répartis autour de la chambre d'expérience. La propagation du faisceau amplifié, située entre la lentille L4 et le hublot de tubage argon (HTA), se fait sous argon dans le but de limiter la longueur totale de propagation des faisceaux lasers amplifiés sous air. En effet, pour des durées de quelques nanosecondes et des énergies élevées, la diffusion Raman longitudinale du faisceau laser se produisant dans l'air au cours de sa propagation peut être de nature à endommager les structures mécaniques et composants optiques situés après le dernier miroir de transport.

Les faisceaux lasers sont triplés en fréquence par un ensemble de deux cristaux de KDP (SHG) et DKDP (THG). Un rendement de conversion de 70% peut être atteint pour cette conversion vers la longueur d'onde de 351 nm. La lumière convertie est focalisée par un réseau (réseau 3ω) au centre de la chambre d'expérience (voir encadré). Ce réseau fonctionne ●●●

à 25° d'incidence. Il induit un temps retard qui est compensé par un réseau de transmission de densité de traits trois fois inférieure fonctionnant à 25° à la longueur d'onde de 1053 nm (réseau 1 ω) placé en amont des cristaux de conversion de fréquence (SHG, THG). Le faisceau entre la chambre d'expériences en traversant le hublot de chambre (HU). Une lame anti éclat (LAE) et un écran de protection amovible (EPA) assurent la protection de ce hublot vis-à-vis des débris de cibles issus de l'expérience. L'EPA est une optique sacrificielle changée régulièrement. Toutes les optiques en transmission sont en silice (hors cristaux, amplificateurs et EPA). Enfin, la tache focale du laser peut être modifiée suivant les besoins de l'expérimentateur par l'ajout d'une lame de phase (LdP). Deux positionnements sont utilisés suivant les géométries désirées : à 1053 nm (LdP1 ω) sur la face d'entrée la Lame de Référence d'Alignement

(LRA) ou sur la face de sortie de la LAE (LdP3 ω). Par quadruplet, des taches circulaires de 680 μm^2 à elliptiques de 790 x 1430 μm^2 de diamètre à 3% de I $_{\text{o}}$ peuvent ainsi être obtenues sur cible. Les besoins de l'expérience, les considérations de compacité et de performance par sous ensemble aboutissent à une architecture système de granularité variable. 4 sources lasers adressent 44 systèmes de mise en formes temporelles, distribuant elles-mêmes 88 MPA. Ces 88 MPA sont amplifiés par 22 amplificateurs regroupant 8 (2x4) faisceaux élémentaires. Le transport, la conversion de fréquence et la focalisation s'opèrent ensuite suivant une granularité quadruplet. De sa préamplification jusqu'à la focalisation sur cible, chaque faisceau est manipulé par une quarantaine de grand composants optiques de taille métrique parcourant un trajet optique d'environ 480 m. Ce sont au total près de 7000 composants optiques,

dont plus de 100 tonnes de verre laser, qui sont nécessaires au fonctionnement du LMJ complet [3].

Le fonctionnement du laser est rendu possible grâce à un ensemble de diagnostics lasers et un système de pilotage informatique nommé PARC (Prédiction Automatique du Réglage des Chaînes). Ces diagnostics sont situés en sortie de MPA (énergie, temps, champ proche), après la section amplificatrice sur une fuite du miroir M1 (énergie, temps, champ proche, phase), et après conversion de fréquence (énergie, temps). Des radiomètres étalons permettent la calibration régulière de ces voies de mesure en plein faisceau de 35 x 35 cm². Le système PARC permet le pilotage de l'installation au plus près de la configuration des divers équipements du sous-système laser. Il permet notamment de prédire les formes temporelles et spatiales à injecter dans le MPA pour obtenir la puissance quadruplet désirée sur cible. Il assiste la calibration des modèles numériques à l'aide du code Miro [4] permettant les diverses prédictions, assure la sécurité machine, la réalisation du tir et la production des résultats lasers de l'expérience.

DES LENTILLES PLATES EN SILICE NANOSTRUCTURÉE



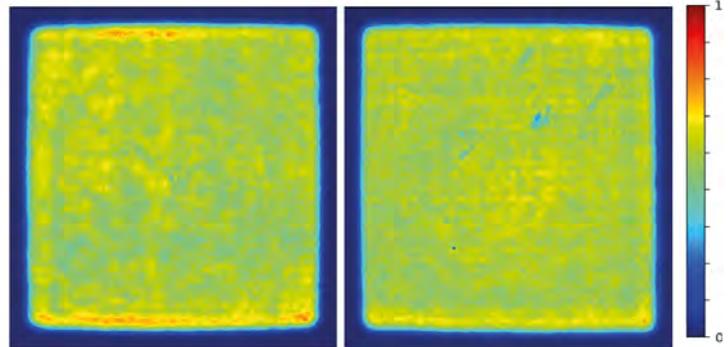
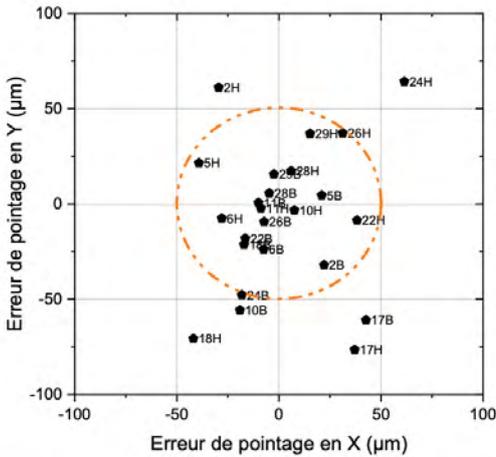
SCF LMJ dans l'atelier de maintenance rapprochée. Les 4 composants optiques vues de face sont des réseaux focalisants de 42x47cm² (© CEA/ E. Journot)

de Fresnel binaire diffractive de 8 m de focale. Plus de 30 m² de ces composants seront installés une fois le LMJ terminé. Il s'agit très probablement d'une des premières illustrations théoriques et pratiques de méta-lentille de grande dimension [1].

Les faisceaux lasers de puissance ultraviolet du LMJ sont focalisés par des structurations quasi périodiques (réseau 3 ω) et non des lentilles. Ces réseaux de diffraction consistent en une structure quasi périodique lamellaire d'environ 2400 traits/mm et 700 nm de profondeur, gravée dans un substrat de silice. La variation continue de période et de cambrure des traits sur la surface assure l'effet de focalisation à l'image d'une lentille

Performances opérationnelles

La performance à atteindre pour le système laser consiste de manière schématique à assurer le bon respect de l'énergie et de la puissance sur cible sur toute la durée de l'impulsion (éventuellement mise en forme). Cette énergie/puissance doit être délivrée sur le point prescrit de l'édifice cible avec la chronométrie requise. L'architecture décrite précédemment permet de différencier ces prescriptions par chaîne (voire par quadruplet pour certaines) offrant une grande flexibilité pour la conception des expériences. Quelques-unes des performances ultimes majeures requises sont une énergie puissance maximale de 1.3 MJ / 400 TW (30 kJ / 9 TW par quadruplet) à la longueur d'onde de 351 nm sur cible, un synchronisme



de l'ensemble des impulsions à 40 ps RMS, un pointage des quadruplets à 50 μm RMS. Nous détaillons dans ce qui suit quelques-unes des performances opérationnelles obtenues dans la configuration actuelle de mi énergie/puissance (15 kJ / 5 TW par quadruplet) et jusqu'à 11 chaînes lasers exploitées simultanément [4]. La figure 2 (gauche) présente le résultat d'une mesure de pointage conduite en centre chambre sur un ensemble de 24 quadruplets. On obtient une précision de pointage de 46 μm RMS respectant d'ores et déjà la spécification à terminaison. Quelques exemples de champs proches mesurés sur le diagnostic

Figure 2. Erreur de pointage mesurée au centre de la chambre sur 24 quadruplets (gauche). Deux exemples de distribution spatiale de champ proche mesurée par le diagnostic d'amplification pour des énergies de 7 kJ par faisceau à 1053 nm environ (droite).

d'amplification sont également présentés pour une énergie par quadruplet amplifiée à 1053 nm de 28 kJ environ (Figure 2, droite). Un contraste (écart type / moyenne des fluences dans une zone de 90% du faisceau) moyen de 7.8% en sortie de section Amplificatrice est obtenu sur 10 chaînes lasers (80 faisceaux) avec 5 à 6 % pour les meilleurs.

La figure 3 présente les énergies et les puissances mesurées par quadruplet lors des plus de 400 tirs de campagnes sur cibles depuis 2014 (triangles noirs). Un exemple de puissance totale mesurée déposée sur cible lors d'une campagne de l'année 2023 est également illustrée (Fig. 3, droite). Cette puissance est la somme totale des puissances mesurées par quadruplet en incluant les erreurs de synchronisme. On constate un bon respect de la forme prescrite. Depuis l'année 2021, des campagnes laser sont conduites sur quelques quadruplets pour valider le fonctionnement du laser à énergie/puissance étendue par rapport au ●●●

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

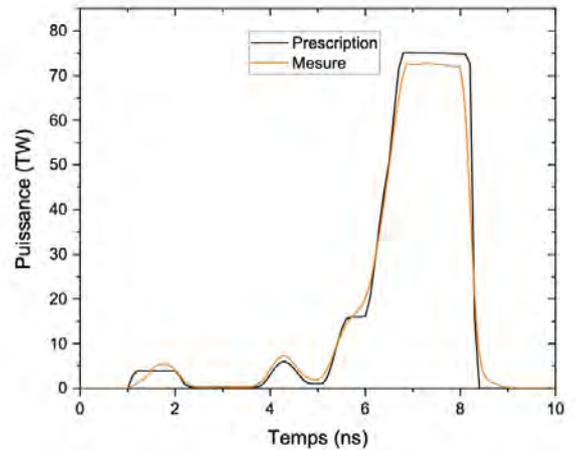
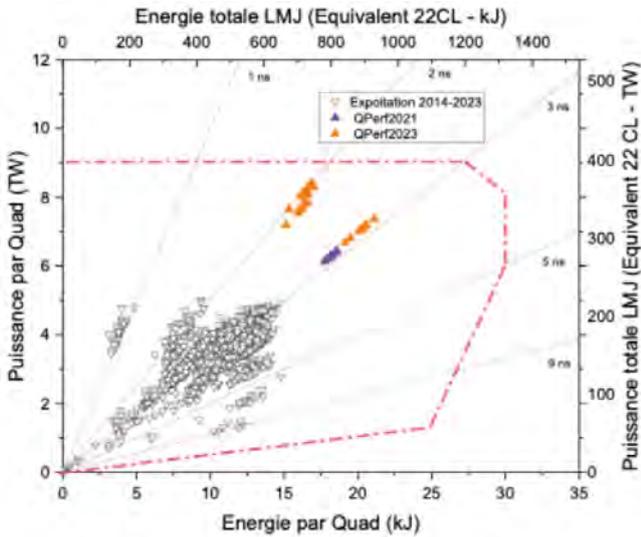
Réseaux Holographiques

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



domaine de fonctionnement actuel. Deux campagnes de ce type ont été conduites à ce jour (QPerf2021 [3] et QPerf 2023) explorant le domaine de fonctionnement jusqu'à une limite proche de la puissance maximale requise (Figure 3 / gauche). Les résultats lasers sur chaînes et métrologie base arrière démontrent la capacité de la chaîne à atteindre ce régime sur ces points visés. Des expériences de ce type doivent se poursuivre pour préparer le fonctionnement du système à la performance visée.

La construction du LMJ aura mobilisé pendant vingt ans plusieurs centaines de personnes au CEA et chez ses partenaires industriels. De sa conception à sa mise en service, il a fallu mettre au point de nouvelles technologies, développer et amener l'industrie au niveau requis pour réaliser certains systèmes. La construction a été confiée à 20 ensembles, qui représentent 250 industriels et 1000 entreprises. Les industriels titulaires des principaux marchés de réalisation du LMJ sont figurés dans la Figure 4.

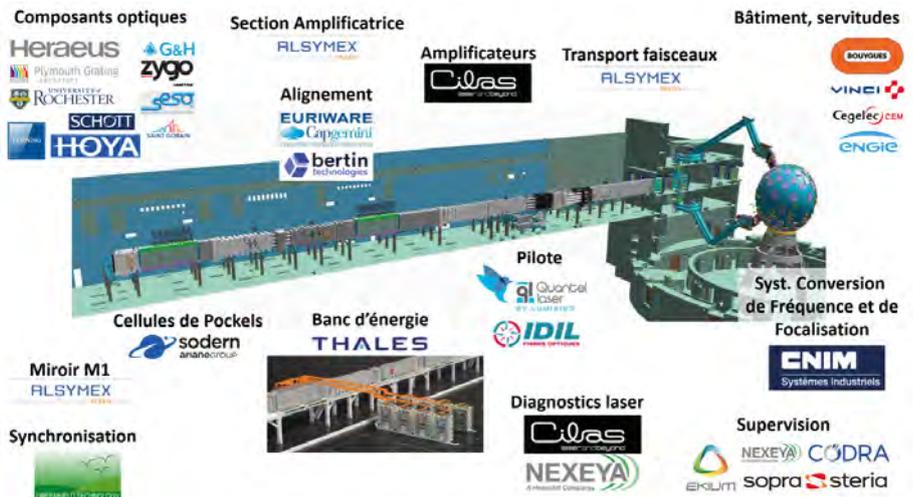
Conclusion

Le LMJ verra cette année 2024 sa dixième année d'exploitation. Durant cette période, plus de 400 campagnes expérimentales ont pu être menées avec succès. L'ajout régulier de

Figure 3. Diagramme des Energies/Puissances mesurée par quadruplet depuis les premières campagnes de 2014 jusqu'aux dernières de 2023. La ligne rouge matérialise la performance à terminaison visée (gauche). Puissance totale déposée sur cible lors d'une campagne laser 2023 utilisant 10 chaînes laser (mesure lissée à 500 ps)

Figure 4. Principaux industriels impliqués dans le projet LMJ.

chaînes lasers étend toujours un peu plus le domaine d'énergie et puissance accessible ouvrant des champs applicatifs multiples. Par ailleurs, les premières campagnes lasers démontrent la capacité du système laser à approcher la performance requise. Ceci prépare la montée en performance qui suivra l'équipement LMJ complet à 22 chaînes lasers. ●



RÉFÉRENCES

- [1] J. Neauport *et al.*, Appl. Opt. **44**, 16 (2005)
- [2] J. Daurios *et al.*, Chocs N°51 (2021)
- [3] O. Morice, Opt. Eng. **42**, 1530 (2003).
- [4] J. Neauport *et al.*, Appl. Opt. **63**, 16 (2024)
- [5] C. Lacombe *et al.*, Opt. Express **31**, 4291 (2023).

Optique frugale pour l'imagerie Infrarouge

Guillaume DRUART*, Florence de la BARRIÈRE, Olivier GAZZANO, Alice FONTBONNE

DOTA, ONERA, Université Paris-Saclay, 91120, Palaiseau, France

* guillaume.druart@onera.fr



Le concepteur en optique est le plus souvent confronté à des critères conflictuels lorsqu'il s'agit de concevoir un système optique : performance versus taille, masse, consommation d'énergie et coût. Ceci l'amène à concevoir des optiques frugales.

<https://doi.org/10.1051/photon/20412627>

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'innovation frugale

« Le minimum pourrait être défini comme la perfection qu'atteint un objet lorsqu'il n'est plus possible de l'améliorer par soustraction » [1]. Cette citation issue du livre *Minimum de l'architecte et designer* John Pawson résonne particulièrement pour le concepteur en optique qui est souvent confronté à des critères conflictuels lorsqu'il s'agit de concevoir un système optique. Il s'agit par exemple d'obtenir les meilleures performances tout en réduisant au maximum la taille, la masse, la consommation d'énergie et le coût d'un système, critères résumés par l'acronyme SWaP-C (Size, Weight and Power – Cost). Cette quête du minimalisme fait également écho à l'innovation Jugaad ou frugale popularisée en France par le chercheur Navi Radjou [2]. L'innovation frugale consiste à répondre à un besoin de manière la plus simple et efficace possible en utilisant

un minimum de moyens. Attention, simple ne veut pas dire simpliste et la quête du concepteur en optique pour concevoir une optique frugale l'amène à chercher des ruptures technologiques. Encouragé à partir des années 2000 grâce à l'émergence des caméras de téléphones portables, cet état d'esprit se propage dans de nombreux domaines, dont l'infrarouge. Que ce soit pour intégrer des caméras infrarouges sur des petits porteurs comme les drones ou les nanosatellites ou bien pour réduire les coûts et diffuser l'infrarouge dans de nombreux domaines applicatifs, l'ONERA s'est inspiré de cette philosophie pour développer des briques technologiques permettant la conception d'optiques frugales pour l'imagerie infrarouge [3]. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur des concepts inspirés de la nature, et nous avons étudié des composants optiques complexes en vue de simplifier les architectures optiques.

La nature comme source d'inspiration

Étudier la vision animale pour concevoir des architectures optiques entre parfaitement dans la démarche frugale. En effet, les millions d'années d'évolution ont permis à la nature de sélectionner de manière optimale le meilleur compromis pour l'animal entre la qualité de son impression visuelle et les ressources énergétiques allouées. Nous constatons donc que les grands animaux, qui ont besoin d'une bonne résolution angulaire, ont adopté des yeux monovoies, en vision binoculaire. Au contraire, les invertébrés, du fait de leur petite taille et de leur ressource énergétique plus limitée, ont plutôt favorisé des yeux à facettes qui comprennent de nombreuses voies optiques associées à un nombre limité de cellules sensibles de leur rétine [4].

À mesure que la taille des animaux diminue, une grande richesse d'yeux aux principes de fonctionnements variés apparaît. Ainsi, les invertébrés sont dotés d'une multitude d'yeux. La mouche, l'abeille, le papillon et la libellule, par exemple, ont des yeux à facettes où une multitude d'optiques sont placées sur un support courbe.

Vers un œil infrarouge cryogénique

L'œil humain, d'un point de vue optique, est un bel exemple d'optique frugale : il est constitué de deux « lentilles » (la cornée et le cristallin), d'un « détecteur » (la rétine), d'un « diaphragme » (l'iris) et d'un « processeur » (le cerveau) pour traiter l'information. L'ensemble constitué de l'œil et du cerveau produit une impression visuelle dont la qualité image est suffisante en termes de résolution et de sensibilité pour permettre à l'homme d'accomplir des tâches complexes. Le compromis frugal pour combiner simplicité et efficacité est la résolution fovéale de l'œil : dans la fovéa, les cellules de la rétine sont plus nombreuses, produisant une image mieux résolue au centre du champ de vue qu'en périphérie. L'ONERA s'est appuyé sur le concept de l'œil humain pour développer des yeux infrarouges cryogéniques. Il s'agit d'intégrer une lentille (le cristallin) dans l'écran

froid d'un cryostat permettant de refroidir un détecteur infrarouge quantique. Intégrer une optique dans un cryostat permet d'obtenir la compacité maximale, un système naturellement athermalisé et une image de très haute qualité avec un fond instrumental très faible. Pour avoir un grand champ de vue comme celui d'un œil humain, nous avons remplacé le hublot du cryostat par une lentille fish-eye (la cornée). Un démonstrateur d'œil infrarouge est illustré à la Figure 1.

La vision en arc en ciel de la mante des mers

À mesure que la taille des animaux diminue, une grande richesse d'yeux aux principes de fonctionnements

variés apparaît. Ainsi, les invertébrés sont dotés d'une multitude d'yeux. La mouche, l'abeille, le papillon et la libellule, par exemple, ont des yeux à facettes où une multitude d'optiques sont placées sur un support courbe. Selon l'espèce, les yeux à facettes sont adaptés pour récupérer des informations visuelles différentes. Un cas remarquable est celui de la mante des mers qui dispose d'une bande équatoriale constituée de voies sensibles à seize teintes différentes de la scène en couleur et en polarisation. Nous avons adapté ce principe pour réaliser une caméra multispectrale infrarouge cryogénique. Il s'agit d'intégrer une matrice de lentilles et une matrice de filtres dans l'écran froid d'un cryostat (voir Figure 2). La matrice de lentilles produit quatre images d'une même scène sur le détecteur, dans quatre bandes spectrales différentes. Cette caméra a été conçue pour détecter et quantifier des panaches de gaz comme le méthane qui sont invisibles à l'œil. La caméra est suffisamment compacte pour être embarquée sur un drone.

Simplifier les architectures optiques avec des optiques complexes

L'approche SWAP-C vise à restreindre le nombre de surfaces optiques utilisées. Pour augmenter le nombre de

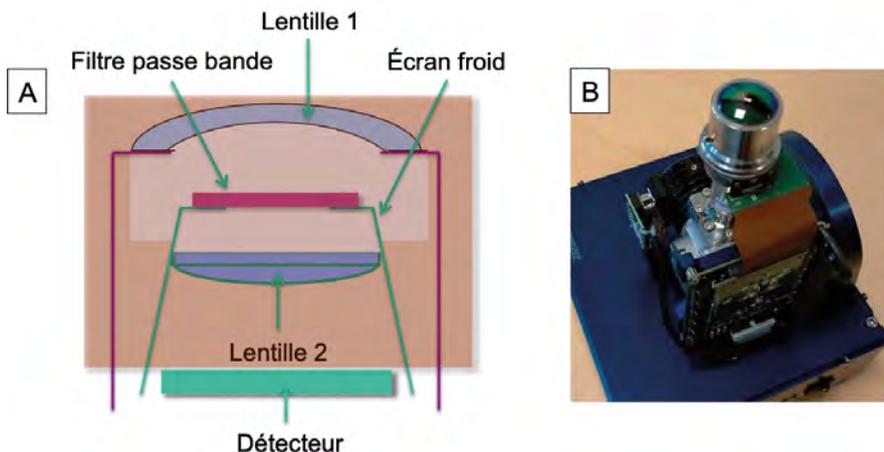


Figure 1. a) principe de l'œil infrarouge, b) photo d'un démonstrateur de type œil infrarouge, c) image obtenue avec ce démonstrateur.

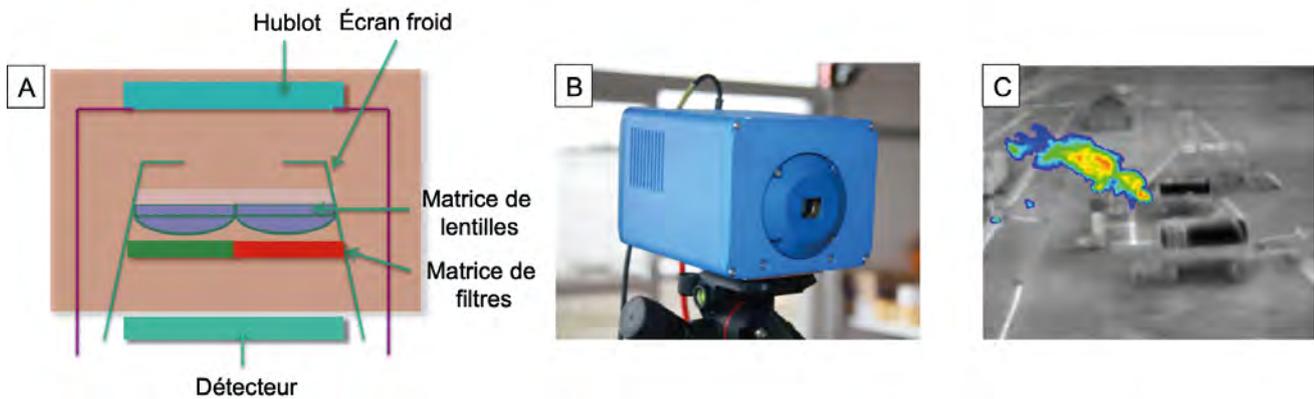


Figure 2. a) principe de la caméra multivoies multispectrale, b) photo d'un démonstrateur multispectral, c) détection et quantification d'un panache de gaz par combinaison des quatre images multispectrales.

degrés de liberté permettant d'obtenir les meilleures performances optiques possibles, le concepteur en optique n'a pas d'autre choix que de complexifier les surfaces optiques. Les surfaces asphériques, qui sont des portions de surfaces coniques autres qu'une sphère, ainsi que les surfaces diffractives, ont permis d'améliorer les performances des systèmes optiques. Cependant, les fortes contraintes en volume et en coût poussent le concepteur en optique à aller encore plus loin. Toute la complexité de la conception d'un système SWAP-C consiste à faire plus avec moins de surfaces. Pour cela, de nouveaux types d'optiques ont été introduits : les surfaces libres dites

« freeform », les métasurfaces et les optiques à gradient d'indice. Ces nouveaux composants permettent d'augmenter considérablement le nombre de degrés de liberté, mais entraînent de nombreux défis dans la conception et l'optimisation de ces optiques, dans leur fabrication, leur métrologie et leur assemblage. Ainsi, paradoxalement, il s'agit de faire des systèmes plus simples en complexifiant ses composants.

Les optiques à surface libre dites « freeform »

Les optiques freeform sont définies comme des surfaces qui n'ont pas de symétrie de révolution et qui ne sont pas une partie excentrée d'une surface à symétrie de révolution. Elles servent principalement à corriger les aberrations hors axe d'un système optique et sont donc naturellement utilisées pour des systèmes catoptriques (à miroirs) ou catadioptriques hors axe. L'augmentation du nombre de degrés de liberté permet de rendre plus compacts de tels systèmes tout en maintenant les performances optiques, de ●●●



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

LED UV

**LED / MODULES LED
VERSION STANDARD ET CUSTOM
POUR PETITES À GRANDES SÉRIES**

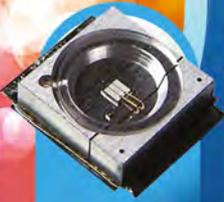
- De 237 à 405 nm
- Large choix de puissances et d'angles
- Boîtiers CMS ou traversants

Large gamme de Photodiodes UV également disponible



HTDS
Hi-Tech Detection Systems





Suivez nous !



www.htds.fr
info@htds.fr

APPLICATIONS

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

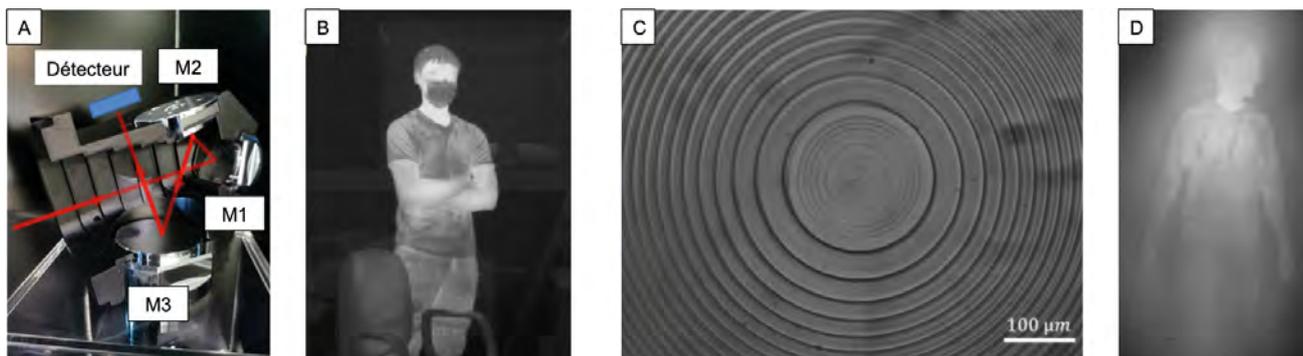


Figure 3. a) Maquette en coupe du système à trois miroirs freeform en configuration αZ , b) image obtenue avec le démonstrateur αZ , c) lentille de Fresnel GRIN infrarouge obtenue par structuration intra-volume avec un laser femtoseconde, d) image obtenue avec la lentille de Fresnel GRIN.

réduire le nombre de surfaces, ou d'autoriser de nouvelles architectures qui ne seraient viables sans les surfaces freeform.

Nous avons par exemple conçu et réalisé un système à trois miroirs appelé αZ et dont la forme est particulièrement adaptée à une utilisation de type boule optronique (Figure 3 A et B). Si la fabrication de miroirs freeform pour le domaine infrarouge est aisément atteignable par usinage diamant, leur réalisation pour des applications dans le domaine du visible reste plus délicate en raison des fortes contraintes sur l'état de polissage des surfaces. En effet, un fort intérêt SWaP-C de ces architectures à miroirs freeform est l'obtention d'une voie optique panchromatique unique pour voir du visible à l'infrarouge lointain, difficile à réaliser avec les systèmes traditionnels à lentilles en raison de la chromaticité des lentilles et de la faible quantité de matériaux transparent sur toute la gamme spectrale visée.

Les métasurfaces / les métaformes / les métalentilles

Les métasurfaces sont une évolution des surfaces diffractives. Ce sont des surfaces composées de structures sub-longueur d'onde qui agissent localement sur l'onde électromagnétique (sa phase, son état de polarisation...) pour contrôler ses propriétés et sa propagation. Ces composants sont très intéressants

dans le domaine infrarouge car, compte tenu de la longueur d'onde ($\sim 3 - 12 \mu\text{m}$), les motifs sont plus grands et donc plus facilement réalisables qu'une version fonctionnant dans le domaine du visible où les motifs seraient plus petits. La possibilité de contrôler localement la lumière permet d'augmenter considérablement le nombre de degrés de liberté car de fortes variations de phase – voire des discontinuités de phase – sont plus facilement envisageables qu'avec des surfaces freeform obtenues par usage diamant. La possibilité de graver des motifs binaires à la surface d'une optique permet d'envisager des composants optiques très minces et donc très légers. Ces composants présentent cependant de nombreux défis à relever. Le premier défi concerne la conception de surfaces de grands diamètres car leur description très locale demande des moyens informatiques importants. Le second défi concerne le caractère naturellement chromatique d'une métasurface qui est conçue pour une longueur d'onde de référence. Cependant, la fusion de plusieurs structures au sein d'une même métasurface permettrait au composant de fonctionner sur un

domaine spectral plus large. Un troisième défi concerne les méthodes de fabrication (photolithographie, lithographie par faisceau d'électron, nanoimpression...) qui limitent la plupart du temps l'inscription de motifs sur des surfaces planes. Graver des métasurfaces sur des surfaces courbes pour obtenir des métaformes est un domaine de recherche très actif actuellement. Par exemple, une équipe de l'Université Harvard pilotée par le chercheur Federico Capasso a réussi à obtenir une métalentille composée de 18,7 millions de motifs, de diamètre 100 mm et de longueur focale 150 mm sur une lame de 500 μm d'épaisseur pesant 14,6 g (une lentille équivalente plan-convexe aurait une épaisseur d'environ 21 mm et une masse de 242,2 g) [5]. L'utilisation d'un filtre spectral est nécessaire pour obtenir une image car le domaine spectral de fonctionnement de la lentille est encore limité.

Les optiques à gradient d'indice

Les lentilles à gradient d'indice (GRIN) sont des optiques où l'indice de réfraction du matériau évolue spatialement et permet d'agir sur la déviation des rayons lumineux dans un volume et plus uniquement au niveau des surfaces. Les GRIN permettent par exemple à une lame à faces parallèles de faire converger un faisceau lumineux incident. Il existe trois géométries courantes

de gradient d'indice : axiale, radiale et sphérique. Les deux dernières géométries permettent de courber les rayons et introduisent donc une puissance optique. Elles sont envisagées pour achromatiser et athermaliser les architectures optiques et donc pour remplacer les doublets ou triplets de ces architectures. Plus récemment, des concepts d'optique GRIN freeform sont envisagés. Leur distribution d'indice peut varier arbitrairement dans les trois dimensions. Agir sur la lumière dans l'épaisseur du matériau ouvre ainsi une nouvelle voie pour les optiques frugales. Les optiques GRIN sont cependant encore délicates à réaliser, surtout dans des matériaux infrarouges et il est encore plus difficile d'obtenir des lentilles de grand diamètre, typiquement centimétrique. Plusieurs approches ont été envisagées pour obtenir des lentilles GRIN : l'inter-diffusion entre multicouches par traitement thermique, l'inter-diffusion par frittage de poudres, les méthodes additives (comme des dépôts par gouttelettes), la cristallisation par gradient de température. L'ONERA travaille avec l'Institut des Sciences chimiques de Rennes sur des méthodes par échange ionique dans des verres de chalc-halogénure et avec l'Institut de chimie moléculaire et des matériaux d'Orsay sur des méthodes de structuration intra-volume avec un laser femtoseconde. Avec cette dernière méthode, nous avons récemment obtenu une lentille de Fresnel GRIN infrarouge (Figure 3 C). Des travaux sont en cours pour améliorer la méthode, et notamment pour réduire les structures

responsables de la diffusion visible sur la première image produite par une lame à faces planes (Figure 3 D).

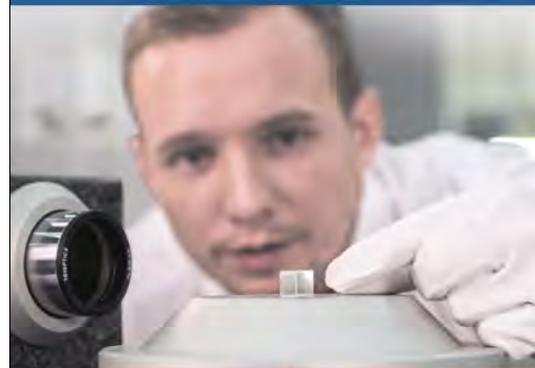
Conclusion : vers le développement d'une approche globale

La problématique SWAP-C pousse le concepteur en optique à explorer de nouvelles voies pour sortir de l'optique traditionnelle. L'ONERA propose plusieurs pistes pour concevoir des optiques infrarouges frugales : s'inspirer de concepts issus de la nature (œil infrarouge, système multivoies) ou maîtriser les optiques complexes (surfaces freeform, métasurfaces ou optiques à gradient d'indice). L'objectif est de permettre, grâce aux optiques frugales, une meilleure diffusion de l'imagerie dans de nombreux domaines applicatifs (drones, robotiques, systèmes médicaux, voitures autonomes et industrie 4.0). Nous entrons ainsi dans un monde où l'instrumentation sera moins conçue pour produire des images interprétables par des humains mais imaginée pour des machines afin d'améliorer leur autonomie et leurs interactions avec le milieu extérieur. Une réflexion sur une approche globale pour la conception de systèmes optiques est nécessaire pour prendre en compte dès la conception toute la chaîne d'imagerie et l'exploitation qui sera faite des données. Cette approche entrerait pleinement dans la démarche frugale pour répondre à une application le plus simplement possible. ●

RÉFÉRENCES

- [1] John Pawson, *Minimum*, Phaidon.
- [2] N. Radjou, J. Prabhu, S. Ahuja, *L'innovation Jugaad : Re devenons ingénieurs !*, Diatino.
- [3] G. Druart, *Approche frugale pour la conception de caméras infrarouges, HDR soutenue en 2019*.
- [4] M.F. Land et D.-E. Nilsson, *Animal Eyes*, Oxford Animal Biology Series.
- [5] J.-S. Park *et al.*, *ACS Nano* **18**, 3187 (2024)

Instrumentation de test optique



Mesure de la plupart des paramètres optiques

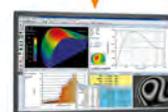
FTM, EFL, BFL, centrage, alignement front d'onde

Applications en R&D et production



Banc de FTM
UV, VIS, IR

Interféromètre "µPhase"



Station de centrage optique



TRIOPTICS France

76 rue d'Alsace
69100 Villeurbanne
Tel. +33 (0)4 72 44 02 03
www.trioptics.fr

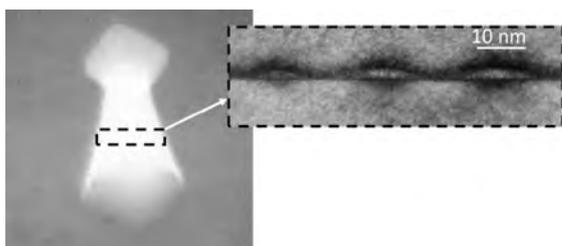
1994 : NAISSANCE D'UN ATOME ARTIFICIEL POUR LA PHOTONIQUE QUANTIQUE

Jean-Michel GERARD*

Université Grenoble Alpes, CEA, Grenoble INP, IRIG, PHELIQS, Grenoble, France

En 1994, Ingénieur DGA/DRET mis à disposition du Centre National d'Etude des Télécommunications de Bagnaux

*jean-michel.gerard@cea.fr



<https://doi.org/10.1051/photon/20412632>

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.

En 1994, l'équipe du CNET Bagnaux animée par Jean-Yves Marzin a présenté pour la première fois le spectre d'émission d'une boîte quantique unique de bonne qualité, obtenue par croissance épitaxiale. L'observation d'une raie d'émission très fine a mis en lumière le caractère discret des états électroniques de cette nanostructure, lui conférant ainsi un statut « d'atome artificiel ». Cette expérience a stimulé un foisonnement d'études spectroscopiques sur les boîtes quantiques (BQ), a assuré la prééminence de cette méthode de fabrication particulière et ouvert la voie à l'exploitation de ces atomes artificiels en photonique quantique.

La photonique quantique exploite aujourd'hui très largement les BQs comme « atomes artificiels », capables de générer à la demande des impulsions lumineuses à un photon. Ces nanostructures semiconductrices sont aujourd'hui quasi-exclusivement obtenues par auto-assemblage en cours de croissance épitaxiale. Cependant, cette méthode découverte par accident au CNET Bagnaux en 1984 [1] a mis une dizaine d'années pour s'imposer par rapport aux approches plus classiques basées sur

la nanofabrication en salle blanche. Après avoir rappelé le contexte scientifique de l'époque, je présenterai une expérience clef qui a fait advenir les BQs au statut d'atome artificiel : l'étude optique de BQs isolées, menée par Jean-Yves Marzin et ses collaborateurs en 1993-94 [2]. L'observation d'une raie de fluorescence ultrafine, plus de 10 fois plus étroite que la limite imposée par la distribution thermique des électrons dans un semiconducteur massif, a mis en lumière pour la première fois le caractère discret des états électroniques confinés dans ces nanostructures.

À LA QUÊTE DES BOÎTES QUANTIQUES

Le développement des nanostructures semiconductrices à partir des années 1970 a été stimulé par les perspectives d'application aux diodes lasers. Les méthodes de croissance épitaxiale couche par couche ont permis de fabriquer des puits quantiques de haute qualité et des lasers à double hétérostructure performants. Deux concepts importants ont été introduits au début des années 80. Les laboratoires Sandia et le CNET Bagnaux ont introduit vers 1982 les puits quantiques contraints, fabriqués à partir de

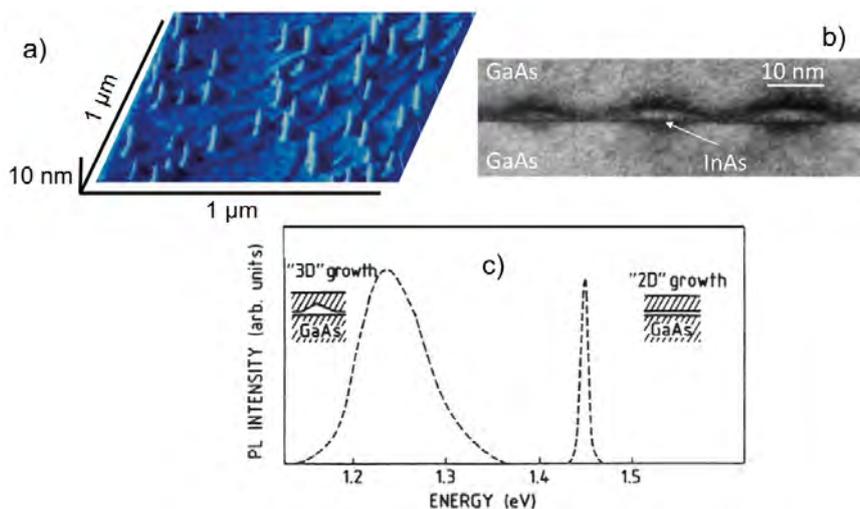


Figure 1. a) Étude par microscopie à force atomique d'une couche d'InAs d'épaisseur moyenne 0.6 nm déposée sur GaAs par épitaxie par jets moléculaires, montrant la formation d'îlots de taille Nanométrique (J.M. Moison, CNET 1994). b) Vue en coupe par microscopie électronique en transmission des inclusions riches en indium obtenues après encapsulation des îlots d'InAs par une couche de GaAs (A. Ponchet, CNRS 1995). c) Spectres de photoluminescence à 10K obtenus pour deux couches minces d'InAs dans GaAs formant un puits quantique (croissance bidimensionnelle ou « 2D ») ou un plan d'inclusions (croissance « 3D »).

matériaux semiconducteurs présentant une légère différence (de l'ordre de 1%) entre leurs paramètres de maille cristalline [3]. L'empilement sans défaut de couches minces reste possible, la différence de maille cristalline étant accommodée par une déformation élastique de la couche « puits ». L'introduction de puits contraints a permis d'élargir la gamme de longueur d'onde couverte par les lasers à puits quantiques et de tirer parti de modifications de la structure de bande induites par la contrainte. Les diodes lasers commerciales, qui sont massivement employées aujourd'hui notamment dans les réseaux de communication à haut débit sont quasi exclusivement des diodes à puits quantiques contraints.

Cette même année 1982, Arakawa et Sakaki ont introduit le concept très différent de laser à BQs [4], qui était appelé à surclasser le laser à puits quantique, si tant est que les boîtes soient de taille très similaires (voir insert 1). Cette proposition fondatrice a stimulé une intense activité de recherche ciblant la fabrication de BQs en salle blanche, en s'appuyant sur les méthodes et outils éprouvés de la microélectronique. A titre d'exemple, Jean-Yves Marzin et Alice

Izraël ont étudié au CNET des boîtes de 20nm de taille latérale obtenues en utilisant la lithographie électronique pour fabriquer un masque sur une structure à puits quantique, puis la gravure ionique réactive pour définir les bords latéraux des boîtes quantiques [5]. L'interdiffusion des matériaux formant un puits quantique ou encore la croissance localisée sur des substrats structurés à l'échelle nanométrique ont aussi permis de fabriquer des boîtes quantiques. En dépit des efforts consacrés de 1985 à 1994 environ, ces approches de fabrication « top-down » n'ont pas débouché, d'une part du fait de fluctuations trop grandes des tailles latérales, d'autre part du fait de la médiocrité des propriétés optiques des boîtes obtenues.

À partir de 1995 environ, l'auto-assemblage en cours de croissance épitaxiale devait s'imposer comme la méthode de choix pour la fabrication des BQs. C'est la seule méthode employée à ce jour au plan industriel pour fabriquer des composants à BQs, tels que les diodes lasers et les sources de photons uniques. Le principe de ce procédé est illustré par la Figure 1, dans le cas du système le mieux connu, InAs/GaAs. InAs et GaAs présentent ●●●

Manufacturer of precision optics

8 subsidiaries
250 employees

HEF Photonics, today on 2 continents and tomorrow with you around the world.



New plant
Saint-Etienne

Optical components
manufacturing
1000 m²

Expertises:

- Optical manufacturing
- Optical Coating (single layer to complex stack)
- Photolithography (masking, lift off)
 - Laser texturing
- Vacuum and Materials



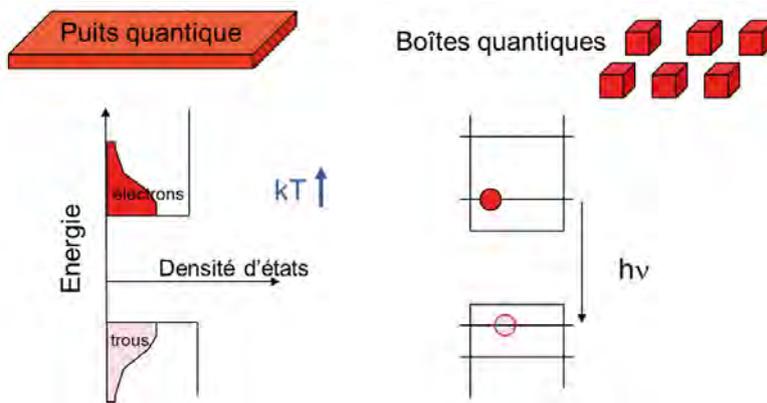
un désaccord de paramètre de maille très élevé, voisin de 7% en valeur relative. Quand on dépose par épitaxie par jet moléculaire (EJM) une couche fine d'InAs sur GaAs, on observe la formation spontanée d'îlots d'InAs de taille nanométrique sur la surface. Ce changement de morphologie permet de relaxer efficacement l'énergie élastique

de la couche d'InAs, sans pour autant créer des défauts structuraux tels que les dislocations d'interface. On peut ensuite recouvrir ces îlots en déposant à nouveau du GaAs. Bien que cette étape modifie la forme, la taille et même la composition des îlots du fait d'une redistribution des atomes d'indium, on obtient des inclusions nanométriques

riches en indium, avec une bande interdite plus petite que celle du matériau GaAs qui les entoure et qui constituent par conséquent des BQs.

Ce procédé de fabrication de BQs par auto-assemblage a été découvert par accident par Goldstein, Glas, Marzin et leurs collaborateurs en 1984 [1]. A l'époque, ils voulaient explorer les limites du système contraint InGaAs/GaAs et ont cherché à insérer des couches fines d'InAs pur dans GaAs. Ils ont observé pour certaines couches trop épaisses le passage à un mode de croissance tridimensionnel avec formation d'îlots en surface et ont été les premiers à remarquer la présence d'une raie d'émission spécifique, intimement liée à la présence d'inclusions riches en indium dans la structure. Dans leur article consacré à cette découverte, les auteurs soulignent que ces inclusions sans défauts structuraux présentent un grand intérêt pour l'étude des propriétés (intrinsèques) de BQs de bonne qualité. *A contrario*, ils n'ont pas mentionné de perspectives d'application. La raie d'émission associée aux BQs présentant une largeur spectrale (~100nm) bien supérieure à celle d'un puits quantique, il semblait exclu qu'on puisse les utiliser efficacement comme milieu actif dans un laser. De ce fait, l'importance de cette découverte n'a pas été immédiatement reconnue par la communauté scientifique.

L'INTÉRÊT DES BOÎTES QUANTIQUES TEL QUE VU EN 1982



Un puits quantique est constitué par une couche semiconductrice de quelques nanomètres d'épaisseur entourée d'un matériau de plus grande bande interdite, non représenté sur le schéma ci-dessus. Dans ce système bidimensionnel, les électrons et les trous sont confinés selon la direction verticale, mais libres de se mouvoir dans le plan du puits. Quand on injecte des électrons et des trous, par exemple en vue d'une application de diode laser, ceux-ci se distribuent dans les bandes d'états du puits selon la loi de Fermi-Dirac. Une toute petite partie des paires électron-trou injectées, situées au niveau du gap du puits, sont effectivement utiles pour donner du gain. En 1982, Arakawa et Sakaki ont proposé de remplacer le puits par un ensemble de boîtes quantiques. Du fait du confinement dans les trois directions de l'espace, les états permis sont discrets et bien séparés à l'échelle de l'énergie thermique kT (25 meV à 300K) si toutes les dimensions des BQs sont plus petites que 10 nm typiquement. Dans ce cas, les premières paires électron-trou injectées ne peuplent que les états de plus basse énergie. Si les BQs sont toutes de forme et de taille identique, toutes les paires injectées donnent du gain à une même fréquence ν , correspondant au gap commun à toutes les BQs, avec un impact positif sur les principales propriétés de la diode laser (courant de seuil, stabilité en température, gain différentiel et modulation en fréquence). En pratique, la dispersion en taille des BQs doit être très petite (quelques pour cents) pour que la courbe de gain soit plus piquée pour un plan de BQs que pour un puits. Les BQs n'ont trouvé de ce fait que quelques applications de niche dans le domaine des lasers.

ÉTUDE D'UNE BOÎTE QUANTIQUE UNIQUE

Nous avons conduit en 1992-1993 une étude approfondie de l'auto-assemblage des BQs, qui nous a permis de mettre en lumière le rôle crucial des paramètres dynamiques (par exemple la vitesse de croissance, qui joue *a contrario* un rôle très mineur dans le cas des puits quantiques), de rendre ce procédé parfaitement reproductible, et de diminuer un peu leur largeur spectrale en améliorant l'uniformité de taille des BQs [6]. Pour nous permettre d'entrevoir ce que seraient les propriétés d'un système de BQs de tailles et de formes parfaitement

identiques, Jean-Yves Marzin a alors proposé d'étudier les BQs à l'échelle individuelle, par spectroscopie de microphotoluminescence confocale. Le principe de l'expérience est illustré par la Figure 2. Nous disposions à l'époque de plans de BQs de haute densité surfacique (environ 400 BQs par μm^2), ne permettant pas de sélectionner un seul émetteur au sein de la tache de focalisation du faisceau excitateur. Pour réduire le nombre de BQs, nous avons défini des plots gravés de section carrée et de taille latérale L variable. Pour les plots les plus larges ($L=5\mu\text{m}$) contenant environ 10000 BQs, nous observons une raie large, très similaire à celle du plan de BQs (à l'exception près d'une structuration à courte échelle qui n'est pas

associée à du bruit). On observe un spectre radicalement différent pour un plot contenant en moyenne 100 BQs ($L=0.5\mu\text{m}$) ; il devient discret, constitué de raies dont la largeur en fréquence (limitée pour la plupart par la résolution du spectromètre) est au moins 10 fois plus faible que l'énergie thermique kT (1 meV à la température de l'échantillon, ici $T=10\text{K}$). Pour des plots encore plus petits ($L=0.15\mu\text{m}$) contenant en moyenne 8 BQs, on observe quelques raies fines seulement, à des fréquences variables d'un plot à l'autre. Enfin, en étudiant un grand nombre de ces petits plots, on peut construire un histogramme de distribution des fréquences d'émission, qui reproduit assez fidèlement la forme de la raie d'émission de l'ensemble

de BQs. On peut donc conclure que, au moins dans les conditions de l'expérience, chaque BQ émet une seule raie, très fine, à une fréquence qui lui est spécifique. La largeur du spectre d'ensemble est donc purement inhomogène, c'est-à-dire associée à la variation de fréquence d'émission d'une inclusion à une autre.

Cette expérience, très simple sur le plan conceptuel, est très riche d'enseignements quant à la dimensionnalité de l'émetteur isolé. L'observation de raies très fines à l'échelle de kT ne peut s'expliquer que si l'émission est induite par une transition entre des états électroniques discrets d'électrons et de trous. Une inclusion riche en indium se comporte donc bien comme une BQ (autrement dit comme un ●●●

JEAN-YVES MARZIN, BÂTISSEUR ET PIONNIER

Jean-Yves le bâtisseur est bien connu de notre communauté. Son charisme et sa longévité en tant que directeur de l'Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes du CNRS (actuellement CNRS Ingénierie) ayant rendu légendaires sa figure et son écharpe rouge. Son rôle est reconnu également pour la structuration des nanotechnologies françaises à travers une forte action en faveur du réseau RENATECH de centrales de nanotechnologies et lors de la fusion du L2M et du Laboratoire de Bagnex du CNET, pour créer le Laboratoire de Photonique et de Nanostructures, puis dans celle du LPN et de l'Institut d'Électronique Fondamentale qui a donné naissance au Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies. Sa vision transdisciplinaire est probablement un peu moins connue. J'ai pu l'apprécier lors de la création du réseau C'Nano (aujourd'hui Unité d'Appui et de Recherche du CNRS) qu'il a favorisée aux côtés de Jean-Louis Robert, un autre cher collègue dont on regrette la disparition en 2023.

L'article de Jean-Michel Gérard nous rappelle une tout autre facette. Le Jean-Yves pionnier, lors de la première observation de boîtes quantiques auto-assemblées en semiconducteurs III-V et de la première mise en évidence de leur émission optique. Ces premières ont pour origine son travail de fond sur les puits quantiques contraints en semiconducteur.

Nous avons été nombreux, les collègues du CNET Bagnex, à avoir bénéficié de son programme de calcul des niveaux électroniques des puits quantiques, programme que nous avons utilisé pour comprendre leur réponse électronique et optique ou pour optimiser tel ou telle fonctionnalité photonique. Il y a aussi l'autre Jean-Yves, indissociable, celui qui a traversé toutes ces époques. L'empêchement de tourner en rond. Celui dont l'œil pétillant devançait la question qui secouait, dérangeait, voire énervait, la question qui dans tous les cas obligeait à s'interroger davantage, à mieux se positionner et à parfaire l'argumentaire. J'aime me souvenir de Jean-Yves sous toutes ces facettes et je sais ne pas être le seul. Nous serons nombreux, les 23 et 24 janvier 2025, aux journées organisées au C2N pour célébrer l'épopée de boîtes quantiques épitaxiées et la mémoire de Jean-Yves. Au nom de tous ceux qui ont eu le plaisir et le privilège de côtoyer Jean-Yves, j'adresse à son épouse Nakita et à leurs enfants Anahita, Azadeh et Sina nos profondes sympathies.

Ariel Levenson
Directeur de recherche CNRS au C2N
De 1985 à 1997 ingénieur au Centre
National d'Études des Télécommunications
de Bagnex, puis chercheur au LPN
Président sortant de la SFO

puits de potentiel) pour les électrons comme pour les trous. La fluctuation de la fréquence d'émission d'une inclusion à une autre en apporte une autre preuve, puisque celle-ci peut très naturellement être attribuée, sur la base de modélisations simples, aux variations de l'énergie de confinement quantique en fonction de la taille de l'inclusion. Enfin, l'absence de transitions optiques additionnelles à plus haute énergie, dans la gamme attendue pour les transitions entre états excités, prouve la relaxation très rapide des électrons et des trous vers leurs états fondamentaux respectifs. Ce point a été mis en exergue en [2], car un blocage de la relaxation, tel que prédit à l'époque par des modèles simples de relaxation assistée par phonons, aurait ruiné tout espoir d'application aux diodes laser ou autres composants photoniques.

UN HÉRITAGE FÉCOND

Dans un contexte où les études sur les BQs fabriquées par voie « top-down » n'avaient pas permis l'observation des raies fines attendues pour des BQs, cette expérience a largement contribué à établir l'auto-assemblage en cours de croissance épitaxiale comme la méthode de choix pour fabriquer des BQs de bonne qualité et explique au moins en partie l'abandon rapide des approches « top-down » à cette époque. L'étude spectroscopique de BQs à l'échelle individuelle est devenue un vaste champ expérimental. Grâce aux expériences conduites par des centaines d'équipes de par le monde, les propriétés des boîtes quantiques sont aujourd'hui connues très finement. D'autres propriétés intrinsèques ont été mises en évidence (par exemple la dépendance de la fréquence d'émission à l'état de charge de la BQ) ainsi que les perturbations induites sur la BQ par son environnement électrostatique, phononique ou de spin. De par ses états électroniques discrets, une BQ peut être vue comme un atome artificiel, qui présente des atouts uniques pour reproduire, dans un milieu solide, des expériences

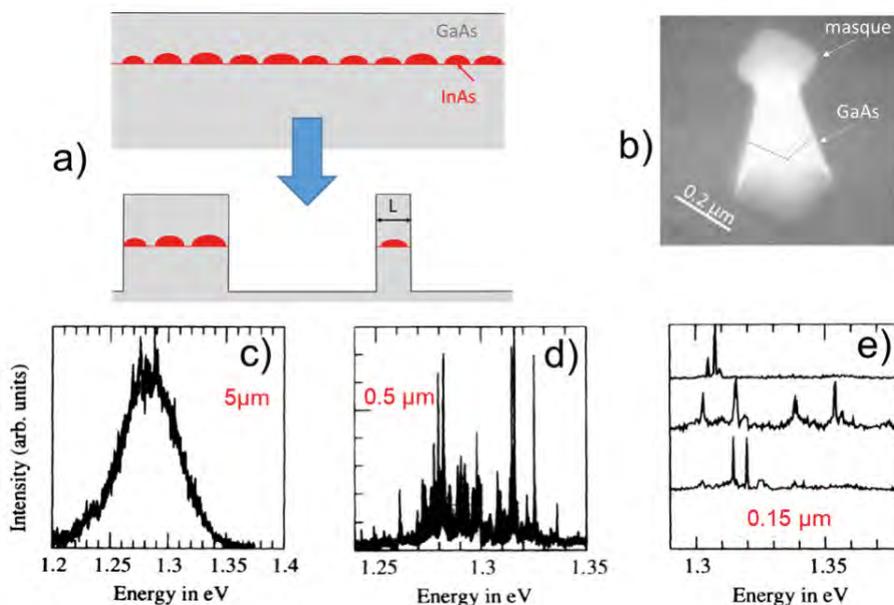


Figure 2. Illustration schématique de la méthode employée pour isoler quelques BQs : des plots sont gravés à partir d'une hétérostructure contenant un plan dense de BQs. b) Vue au microscope à balayage d'un des plus petits plots gravés. c)-e) Spectres de microphotoluminescence obtenus à 10 K pour des tailles latérales de plot décroissantes.

habituellement réalisées avec des atomes isolés. Dès 1995, l'équipe de Bagnoux a lancé des études d'électrodynamique quantique sur des BQs dans des microcavités optiques semiconductrices, inspirées par celles de Serge Haroche sur les atomes de Rydberg. Un tel atome artificiel permet aussi, comme l'atome de calcium isolé utilisé par Alain Aspect dans ses expériences pionnières, de générer des impulsions à un photon. En 2001, ces

études devaient déboucher à Bagnoux sur la démonstration de la première source brillante et monomode de photons uniques à la demande, constituée par une boîte unique dans une cavité de type micro-pilier à miroir de Bragg [7]. Le domaine de l'optique quantique avec des boîtes quantiques s'est considérablement développé depuis, et connaît depuis peu ses premières applications industrielles avec l'essaimage de la start-up Quandela par le CNRS. ●

RÉFÉRENCES

- [1] L. Goldstein, F. Glas, J.Y. Marzin, A.M. Charasse, G. LeRoux, *Appl. Phys. Lett.* **47**, 1099 (1985)
- [2] J.Y. Marzin, J.M. Gérard, A. Izraël, D. Barrier, G. Bastard, *Phys. Rev. Lett.* **73**, 716 (1994)
- [3] J.Y. Marzin and E.V.K. Rao, *Appl. Phys. Lett.* **43**, 560 (1983)
- [4] Y. Arakawa et H. Sakaki, *Appl. Phys. Lett.* **40**, 939 (1982)
- [5] J.Y. Marzin, A. Izraël, L. Birotheau, *Solid-state Electron.* **37**, 1341 (1994)
- [6] J.M. Gérard, J.B. Génin, J. Lefebvre, J.M. Moison, N. Lebouché, F. Barthe, *J. Crystal Growth* **150**, 351 (1995)
- [7] E. Moreau, I. Robert, J.M. Gérard, I. Abram, L. Manin and V. Thierry-Mieg, *Appl. Phys. Lett.* **79**, 2865 (2001)

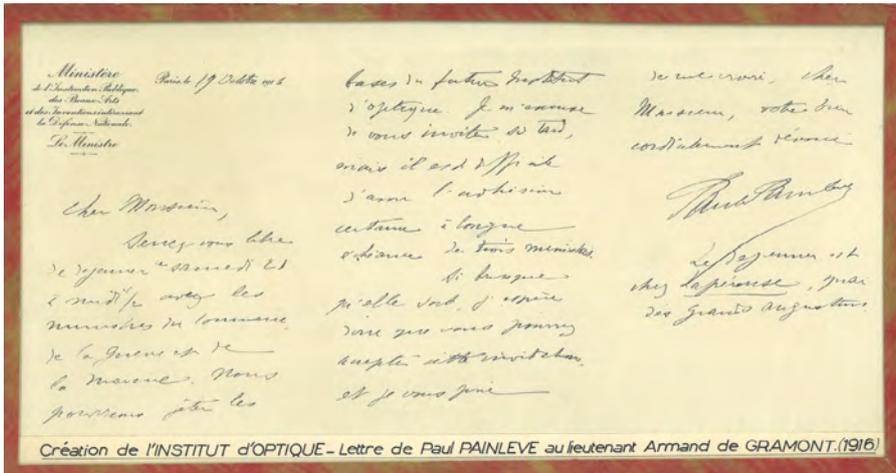


Figure 1. Lettre de Paul PAINLEVE à Armand de Gramont datée du 19 octobre 1916, l'invitant au restaurant Lapérouse pour discuter du projet de création d'un Institut d'Optique [1].

Nice : c'est alors l'un des plus éminents ingénieur-opticiens de la planète, ayant réalisé le calcul de nombreux systèmes. Les deux hommes ont une idée : fonder le premier enseignement en Optique Instrumentale de France. De Gramont a initialement le projet de créer une chaire d'Optique Instrumentale pour Henri Chrétien à la Sorbonne. Au cours des mois qui suivirent, ce projet devient celui de la création d'un Institut d'Optique, comprenant une École Supérieure d'Optique pour la formation des ingénieurs, un Laboratoire Central d'Optique associant savants, pouvoirs publics et industriels, et une École Professionnelle formant des ouvriers spécialisés.

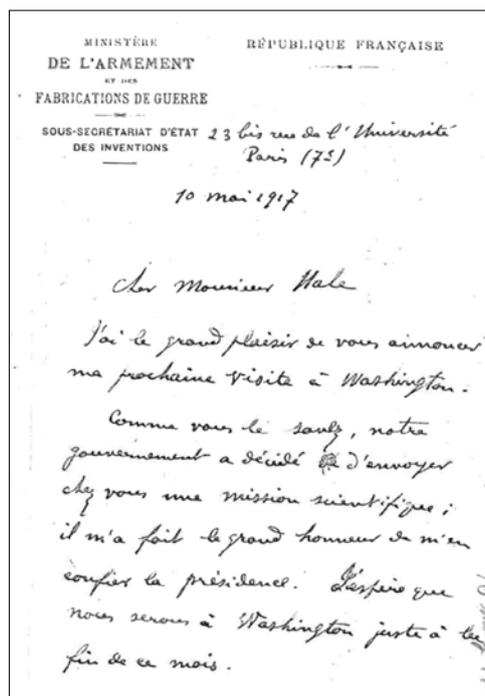
De Gramont contacte les pouvoirs publics : il expose son projet à Paul Painlevé, lors d'un dîner le 21 octobre 1916 au restaurant Lapérouse (voir Fig. 1). Le ministre l'assure de son soutien, et une commission interministérielle est mise en place pour dessiner les contours du futur Institut.

LES ÉTATS-UNIS ET LEURS SCIENTIFIQUES ENTRENT EN GUERRE

Le début de l'année 1917 voit l'apparition d'une immense menace pour les alliés : l'armée allemande, étranglée par le blocus naval imposé par la Grande-Bretagne depuis le début du conflit, décide de répliquer en menant une guerre sous-marine à outrance contre les navires marchands

fournissant des ressources aux alliés. Cette décision contribue à faire rapidement basculer les Etats-Unis, nation neutre, mais qui a déjà déploré la perte de navires marchands et civils dans l'Atlantique. De fait, l'opinion

Figure 2. Lettre de Charles Fabry à George Hale annonçant sa participation comme président de la mission scientifique alliée aux Etats-Unis [2].



publique et du gouvernement a progressivement évolué vers un soutien à la guerre depuis le torpillage du Lusitania en mai 1915. Le gouvernement américain avait alors mis en place le *Naval Consulting Board*, et placé à sa tête Thomas Edison (1847-1931), afin de trouver une parade contre les sous-marins.

Plusieurs scientifiques se sont également directement impliqués pour soutenir une entrée en guerre. Au premier rang d'entre eux, George Ellery Hale (1868-1938), l'astrophysicien de renom : il a participé à la création de nombreux observatoires, notamment celui du Mont Wilson, et est fondateur de l'*International Union for Cooperation in Solar Research* (IUCSR), précurseur de l'Union Astronomique Internationale. Membre de la *National Academy of Sciences* (NAS), Hale obtient en avril 1916 le vote unanime d'une résolution par le conseil de la NAS, demandant au Président de l'Académie « d'informer le président des Etats-Unis, que dans l'éventualité où les relations diplomatiques seraient rompues avec un autre pays, l'académie souhaite se mettre à disposition du gouvernement pour rendre tous les services relevant de sa compétence. » [2]. Woodrow Wilson est approché le 26 avril 1916 et approuve une poursuite, discrète, du projet. La NAS convient bientôt de la formation du *National Research Council* (NRC), organisme dont le rôle sera de produire recherche scientifique et expertises, au service dans un premier temps de la recherche nationale. Son premier chairman sera bien entendu George Hale. Il sera accompagné notamment de Robert Millikan, futur prix Nobel 1923, et Arthur Noyes. Après-guerre, tous trois travailleront ensemble pour faire du *California Institute of Technology* l'établissement prestigieux que nous connaissons aujourd'hui. Hale fait partie à l'été 1916 de la première mission scientifique au Royaume-Uni et en France approuvée par le département d'État américain. Hale y revoit un de ses prestigieux collègues de l'IUCSR, un certain

Charles Fabry, qu'il connaît bien : le physicien français est le pionnier de la spectroscopie stellaire, grâce notamment aux apports de l'interféromètre qui porte son nom et celui de son collègue Alfred Perot. L'observatoire du mont Wilson en est équipé, ce qu'a pu constater Fabry en 1910, lors de sa visite sur place à l'occasion de la 4^e conférence de l'IUCSR.

Le 6 avril 1917, le congrès américain déclare la guerre à l'empire allemand. Le jour même, le NRC contacte les académies des sciences des nations alliées, qui répondent positivement, à l'image de l'académie des Sciences française.

Le désormais ministre de la Guerre Paul Painlevé projette l'envoi d'une mission scientifique alliée aux Etats-Unis, afin d'échanger sur les résultats des recherches militaires menées depuis le début de la guerre.

La STAé est sollicitée pour désigner des experts sur les différents sujets qu'il conviendra d'aborder ; sujets très nombreux mais parmi lesquels celui de la détection des sous-marins occupe une place particulièrement importante. Armand de Gramont de Guiche, qui parle anglais, fera le voyage comme spécialiste en aéronautique. Il rejoint Sir Ernest Rutherford, le physicien néo-zélandais père de la physique nucléaire ; le commandant de marine britannique Cyprian Bridge, spécialiste de la question des sous-marins ; Henri Abraham, en charge des questions de radio-électricité et de télégraphie sans fil, assisté d'un jeune ingénieur, Paternot, formé auprès de Gustave Ferrié. Le capitaine Charles Dupouey, officier normalien, est le secrétaire de la mission et aidera à la traduction. La mission scientifique alliée est placée sous la présidence de Charles Fabry, promu commandant à cette occasion et qui bien entendu, traitera des questions d'optique (voir Fig. 2). Comme le note Hale lui-même dans une lettre au président Woodrow Wilson, le hasard est heureux : « *It happens very fortunately that these men are old acquaintances, with whom we*

have co-operated in former years in the International Association of academies and the International Union for Cooperation in Solar research » (lettre de Hale à Woodrow Wilson datée du 5 mai 1917, Washington DC [2]).

L'essentiel du groupe part vers le Nouveau Monde le 19 mai 1917 à bord du paquebot « L'Espagne ». La mission embarque des quantités massives d'instruments et d'appareils scientifiques avec elle.

LA MISSION SCIENTIFIQUE ALLIÉE AUX ETATS-UNIS

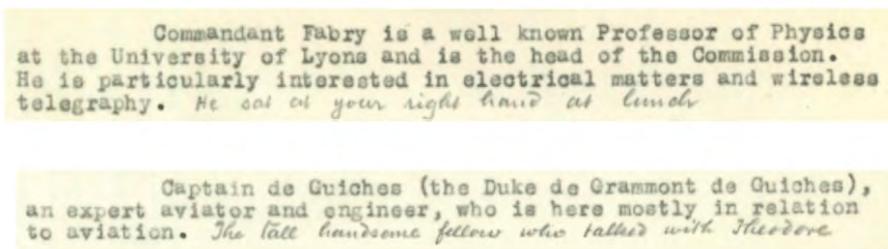
Les scientifiques alliés débarquent à New-York le 28 mai 1917. Ils font escale à l'hôtel Vanderbilt, et dînent au University Club. Le 30 mai, ils empruntent le Congressional Limited vers Washington, où ils sont accueillis par Hale. Ils seront hébergés à l'hôtel Powhattan pour leur séjour. Dans les semaines qui suivront, les War and Navy Departments organisent, par l'entremise du NRC de Hale, quelques premières conférences tenues dans les laboratoires du Bureau of Standards entre les membres de la mission scientifique française et les officiers américains. Le 9 juin, ils rencontrent le Naval Consulting Board présidé par Thomas Edison, toujours à l'étude des techniques de détection des sous-marins. Dans la foulée, les Français réclament l'organisation d'une large conférence regroupant ingénieurs et scientifiques américains afin d'aborder en profondeur le problème. À cette fin, Millikan, qui préside le sous-comité

« sous-marins » du NRC, redouble d'effort pour contacter sur toute la côte Est des experts susceptibles de participer instamment à la conférence qui aura lieu du 14 au 16 juin. Le 15 juin, le chimiste français Albert Grignard, prix Nobel 1912, accompagné de son interprète Engel, rejoint la mission. Le 28, c'est l'ingénieur Giorgio Abetti, de l'observatoire astronomique italien, expert en télécommunications qui atteint Washington. Le programme des conférences se poursuit, sur l'observation des aéronefs, la détection des fusils par le son, les gaz de combat, les communications navales. Entre les conférences, la délégation française multiplie les visites : à l'Université de Chicago, où ils découvrent la machine à graver les réseaux de Rowland et où Robert Millikan lui-même leur présente son expérience de mesure de la charge de l'électron ; à Buffalo dans les ateliers aéronautiques du constructeur Curtiss, à Détroit, dans les usines d'automobiles de la ville...

Le point d'orgue de mission scientifique est la visite de la délégation, mi-juillet, à Thomas Edison, déjà rencontré dans le cadre des échanges avec le NCB. Dans le New Jersey, la mission déjeune dans le pavillon du country club puis visite l'usine d'Orange (Voir Fig. 3 et le cliché en tête d'article).

La semaine suivante, Fabry envoie un mot de remerciement à Edison qui répond entre les lignes, qui intime à son secrétaire de recontacter Fabry : le Directeur du NCB aurait en ●●●

Figure 3. Extrait de la description (erronée pour Fabry !) des membres de la commission scientifique française transmis à Edison par son secrétaire William Henry Meadowcraft [3].



tête un moyen de sauver 50% de la flotte marchande alliée... mais les archives ne parlent pas davantage de cette solution miracle.

Les dernières semaines de séjour comprennent quelques conférences mais sont aussi le temps de l'analyse de la masse considérable de renseignements et d'informations glanées. Abraham et Fabry rédigent à l'attention de Millikan une note de bilan sur la question de la détection des sous-marins. Le ton est sombre, car les difficultés semblent particulièrement difficiles à surmonter.

"The danger is very grave. [...] If we do not succeed in destroying the submarines, the tonnage available for transportation will become zero in a small number of months. It is only by an offensive program that we shall be able to maintain freedom of the sea – a necessary condition for victory." [Rapport de Charles Fabry et Henri Abraham adressé à Robert Millikan, daté du 11 août 1917 [2]]

Le lendemain 12 août, la mission scientifique française reprend la mer. À son retour, Charles Fabry rédige un « *Rapport sur la mission scientifique française aux Etats-Unis* » à l'attention du Ministère de l'Armement, dont une copie se trouve dans les archives de l'Institut d'Optique.

L'HEURE DU RETOUR

Au retour de Fabry et de Guiche, ; les conditions ne sont pas réunies pour lancer plus en avant le projet de l'Institut d'Optique : de Guiche est à nouveau sollicité pour retourner aux Etats-Unis conseiller les ingénieurs américains en aéronautique, Fabry poursuit ses recherches en retournant temporairement auprès de son laboratoire en Provence. Les premiers statuts pour un Institut National d'Optique sont toutefois déposés le 16 février 1918.

Fabry maintient une correspondance avec son collègue et ami Hale pendant les années de guerre. Après l'armistice, De Gramont (Voir Fig. 4) parvient à convaincre les pouvoirs publics de verser une subvention

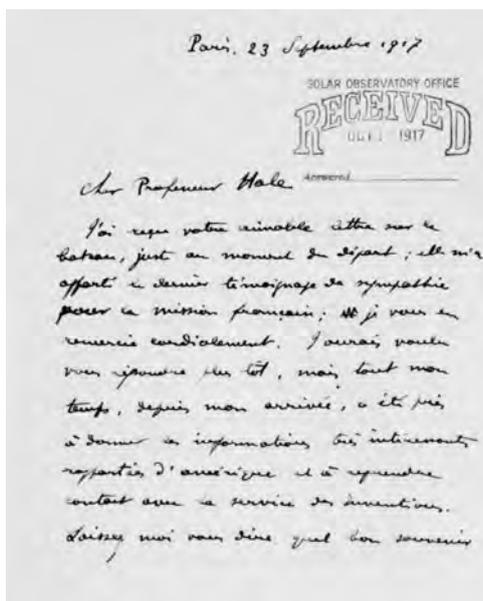


Figure 4. Extrait d'une lettre de Charles Fabry à George Hale datée du 23 septembre 1917, après son retour à Paris [4].

annuelle et commence à prospecter pour identifier un terrain dans Paris où construire le bâtiment.

Au début de 1919, la NAS américaine décide de décerner la médaille Draper à Charles Fabry pour l'ensemble de ses travaux. Fabry remercie chaleureusement Hale qui le prévient par courrier ; mais décline l'invitation de l'Académie de se rendre aux Etats-Unis pour la recevoir, car « *Il reste beaucoup à travailler pour remettre notre pays au rang qu'il veut occuper. Vous savez peut-être que l'on vient de décider la création en France d'un établissement scientifique qui prendrait le nom d'Institut d'Optique théorique et Appliquée...[...]* La création de cet établissement n'est pas encore certaine, car les moyens financiers ne sont

pas encore complètement trouvés ; on vient cependant de désigner le Directeur, et c'est moi qui ai été choisi » [Lettre de Fabry à Hale du 13 mars 1919 [4]].

Hale lui répond :

"I congratulate you most heartily on the probable establishment of your Optical institute and upon your appointment as Director. No better choice of a director could possibly be made[...]" [Lettre de Hale à Fabry, 8 avril 1919 [4]]

Les activités de l'Institut d'Optique démarrèrent progressivement, d'abord hébergé dans les locaux au 140 boulevard du Montparnasse avant que l'établissement soit reconnu d'utilité publique le 10 août 1920, et puisse sécuriser davantage de financement en vue de son installation boulevard Pasteur plusieurs années plus tard.

Quant à la photographie que Fabry mentionne dans son courrier de remerciement à Edison, elle reste le témoignage le plus marquant de cet épisode de la Grande Guerre, qui reste gravé dans l'histoire de l'établissement, à travers la trajectoire de ses deux fondateurs : Armand de Gramont et Charles Fabry.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie pour leur aide précieuse : Marie-Laure Edwards, responsable de la médiathèque de l'Institut d'Optique ; Léonard DeGraaf et le service des archives du Thomas Edison National Park, Alexandra Briseno et le service des Archives de la National Academy of Sciences, Engineering and Medicine ; le service des archives du California Institute of Technology ; et Jean-Christophe Antoine pour son précieux travail sur Armand de Gramont. ●

RÉFÉRENCES

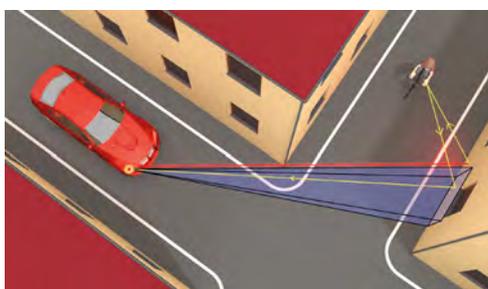
- [1] Archives de l'Institut d'Optique
- [2] Archives de la National Academy of Sciences, Engineering and Medicine
- [3] Archives du Thomas Edison National Park
- [4] Caltech Archives

UTILISER LA LUMIÈRE POUR VOIR DANS LES COINS

Frank CHRISTNACHER*, Martin LAURENZIS, Stéphane SCHERTZER, Emmanuel BACHER

Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis (ISL), 68300 SAINT-LOUIS, France

* frank.christnacher@isl.eu



En utilisant des impulsions laser ultra-courtes qui se réfléchissent sur un mur relais, l'imagerie NLOS permet de reconstruire une scène au-delà du champ de vue en vision directe.

<https://doi.org/10.1051/photon/202412641>

Les nouvelles caméras SPAD (Single Photon Avalanche Diodes) présentent aujourd'hui des performances époustouflantes. Comme leur nom l'indique, elles sont sensibles à un seul photon de lumière, leur résolution temporelle ne cesse d'augmenter pour arriver actuellement à la picoseconde, et certaines matrices atteignent déjà le Mpixels. De telles caractéristiques laissent entrevoir des applications dont on ne pouvait que rêver il y a encore peu : voir la lumière se propager dans l'air (light-in-flight imaging), faire des capteurs à temps de vol flirtant avec des résolutions spatiales de l'ordre du mm, ou encore aller voir dans les coins (non-line-of-sight imaging, NLOS). C'est cette dernière application que nous allons développer dans cet article.

Depuis l'invention de la « camera obscura », les systèmes d'imagerie n'ont cessé d'évoluer vers des dispositifs de plus en plus compacts, rapides et performants (figure 1). L'effet photoélectrique est théorisé en 1905 par Albert Einstein, lui valant le prix Nobel de physique en 1921. Mais ce n'est qu'en 1969 que naît chez Bell Labs le premier capteur CCD comportant 100×100 pixels. Véritable révolution dans le domaine de la photographie et plus largement de l'acquisition d'image, le CCD est ensuite détrôné dans les années 2000 par le CMOS, moins cher et plus simple du point de vue électronique. Ces capteurs provoqueront le passage de la photographie

argentique à la photographie numérique engendrant une explosion d'applications temps réel, tant dans les domaines de la science que de la vie quotidienne. Les capteurs numériques sont partout : en premier lieu dans notre poche avec les smartphones, dans nos voitures pour l'assistance à la conduite et bientôt pour la conduite autonome, dans nos villes et nos maisons pour toutes les applications de surveillance et de domotique ainsi que dans la plupart des objets technologiques du quotidien. Ils contribuent largement à la mondialisation de l'information, aux révolutions sociales et influencent le cours d'une guerre, comme l'ont montré des exemples récents.

Aujourd'hui se profile une seconde révolution, avec des impacts

potentiellement bien plus grands encore et sur un laps de temps sans doute beaucoup plus court, celle des capteurs Single Photon Avalanche Diodes (SPADs). L'arrivée très récente de ces composants et les progrès techniques fulgurants qu'ils permettent constituent la rupture technologique qui fera passer l'imagerie de l'ère numérique à l'ère "calculée" (computational imaging), l'imagerie computationnelle pouvant être définie comme un processus indirect de formation d'images à l'aide d'algorithmes qui reposent sur une quantité importante de calculs, à partir de données acquises par des capteurs optroniques.

L'imagerie computationnelle permet aujourd'hui d'obtenir des images de très grande résolution, souvent



Figure 1. Frise chronologique des technologies de capture d'image.

tridimensionnelle, parfois sans lentille, ni objectif, sur des capteurs qui peuvent être monopixels ou matriciels avec peu de pixels. La grande différence entre les capteurs SPAD et les capteurs CCD/CMOS réside dans l'extrême sensibilité du capteur SPAD (il est capable de réagir à un seul photon) et dans sa capacité à horodater le moment d'arrivée d'un photon sur chaque pixel, ce chronométrage se faisant à la dizaine de picosecondes près.

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES CAPTEURS SPAD

Dans les capteurs CCD ou CMOS, chaque pixel transforme les photons incidents en une charge électrique qui est proportionnelle à l'intensité de la lumière reçue pendant le temps d'exposition (figure 2a). CCD et CMOS ne se différencient que dans la façon de transférer les charges accumulées vers le circuit de lecture

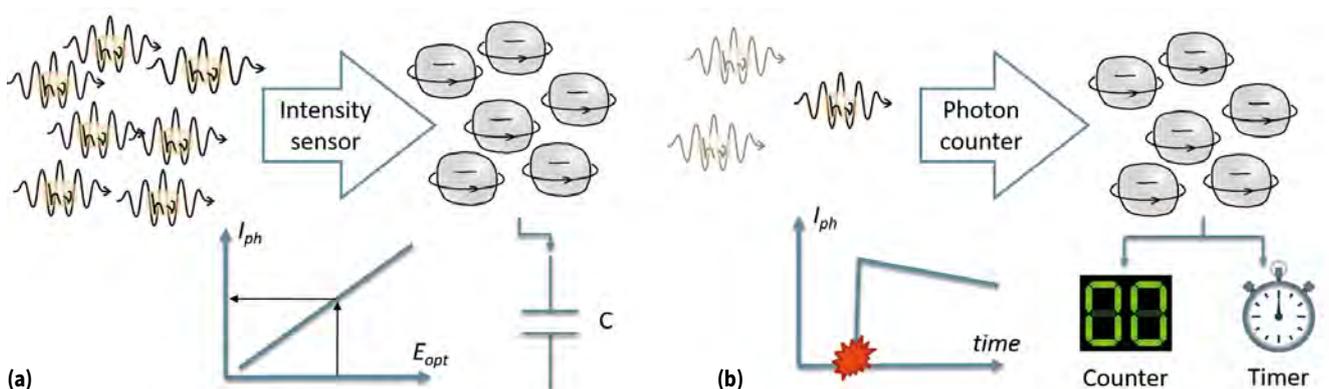
afin de produire une image. Les capteurs SPAD fonctionnent différemment (figure 2b). D'une part, grâce à l'effet d'avalanche, ils sont sensibles à un seul photon de lumière et, d'autre part, le moment d'arrivée de ce photon sur chaque pixel est mesuré avec une très grande précision. Voyons plus précisément ces deux étapes. Un pixel d'un capteur SPAD est une photodiode, ou jonction p-n, qui est alimentée par une tension de polarisation inverse si élevée (au-delà de sa tension de claquage) que lorsqu'un photon arrive, il se produit un phénomène d'ionisation d'impact capable de provoquer une réaction en chaîne de production

d'électrons et donc l'apparition d'un courant d'avalanche qui est lu comme un événement. Après le début d'une avalanche, le SPAD est désarmé en réduisant le biais à une valeur largement inférieure à la tension de claquage pendant une période appelée « temps mort », avant d'être réarmé. Le temps mort est nécessaire pour garantir que tout porteur, coincé dans la jonction suite à un événement d'avalanche, soit libéré ; si le temps mort est trop court et que le SPAD est réarmé, un tel porteur pourrait en effet déclencher une autre avalanche, appelé « post-impulsion », phénomène qui augmente le bruit d'obscurité et diminue le rapport signal sur bruit (SNR) du capteur. Pour cette raison, le temps mort est réglé sur une période suffisamment longue pour annuler les effets délétères des post-impulsions. La sensibilité d'un tel capteur est donc très supérieure à une caméra classique.

Par ailleurs, le moment d'apparition de cette impulsion est chronométré de manière très précise par le circuit de lecture. Rappelons ici qu'un chronométrage à la dizaine de picosecondes permet, à la vitesse de la lumière, de palper une surface avec une précision millimétrique.

Qu'elle soit monopixel ou matricielle, une caméra SPAD peut fonctionner selon deux modes différents, le comptage de photons (qui affiche une image d' "intensité" de la scène) ou le comptage de photons uniques corrélés dans le temps (TCSPC, time correlated single photon counting) qui permet l'affichage d'une

Figure 2. Principe du CCD/CMOS a) et du SPAD b).



statistique temporelle d'arrivée des photons sous la forme d'un histogramme de photons pour chaque pixel. Dans ce dernier mode, le facteur de mérite important est la fonction de réponse de l'instrument (IRF), qui détermine l'incertitude temporelle du processus d'avalanche stochastique en réponse à la détection d'un photon. Même si certains capteurs SPAD monopixels ou matriciels sont plus performants, on peut citer la caméra PF32 de la société Photon Force, un capteur SPAD de 32×32 pixels beaucoup utilisé à l'ISL, pour lequel la gigue est d'environ 150 ps. Rapporté au domaine spatial, cela représente environ 4-5 cm de précision pour la reconstruction d'une scène NLOS.

QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATION DES CAMÉRAS SPAD

Le NLOS ou « voir dans les coins »

Le domaine d'activité de l'imagerie hors du champ de vue, « imagerie NLOS » ou « vision dans les coins », est sans doute l'application la plus spectaculaire des capteurs SPAD. On peut considérer la publication d'A. Velten de 2012 [1], à l'époque en post-doc au MIT, comme fondatrice de ce nouveau domaine de recherche en imagerie computationnelle, souvent désigné en anglais sous le terme de « see around the corners ». En utilisant une caméra à balayage et un laser pulsé, Velten a pu démontrer qu'il arrivait à reconstruire l'image d'un bonhomme caché à la vue directe d'un capteur en analysant les photons diffus réfléchis par un mur de relais.

L'idée qui sous-tend ce papier est relativement simple (figure 3). Au travers d'une ouverture dans une pièce (porte, fenêtre...) laissant apparaître un bout de mur ou de plafond, on tire des impulsions laser. La lumière va être diffusée par ce « relais » dans toutes les directions de l'espace et éclairer tous les objets présents dans cette pièce. Ces objets vont eux-mêmes à nouveau rediffuser la lumière dans toutes les directions de l'espace et une fraction des photons de départ va rebondir sur le mur « relais » en direction de la caméra. On conçoit très bien qu'après ce processus à 3 réflexions¹ très peu de photons reviennent (illumination laser, mur relais → objet, objet → mur relais, mur relais → caméra).

Mais si on utilise une caméra capable de compter chaque photon, tout en mesurant son temps de vol, on peut déterminer la distance parcourue par chacun de ces photons. Après un tel processus à trois réflexions, un temps de réponse donné correspondra, dans l'espace tridimensionnel caché à la vue directe, à un objet qui pourrait se trouver sur un ellipsoïde si le laser et le capteur sont séparés, ou sur une portion de sphère si le laser et le capteur sont confocaux. Pour obtenir plus de précision, le faisceau laser est balayé en différents points du mur relais. Si on utilise un capteur matriciel avec un

¹ Il peut bien sûr y avoir des diffusions multiples avec rebonds sur plusieurs surfaces. Aujourd'hui, les algorithmes les plus complexes ne modélisent que jusqu'à des processus à 5 réflexions (rebonds sur deux surfaces diffusantes + objets cible).

Notre partenariat avec le CEA et le Laser Mégajoule

PUBLI-RÉDACTIONNEL

Depuis 1998, IDIL Fibres Optiques, entreprise spécialisée dans l'ingénierie de systèmes photoniques de pointe, est un partenaire privilégié du CEA pour le projet du LMJ avec des interventions à plusieurs niveaux.

SOURCES LASER

Le premier étage de chacun des quatre halls laser du LMJ, appelé « Source », génère et pré amplifie une première fois l'impulsion laser avant qu'elle ne passe dans un module de pré-amplification (MPA) puis dans la grande section d'amplification principale. Cette impulsion doit être minutieusement façonnée dans le domaine fréquentiel et temporel. Depuis les premières études de qualification technologique, IDIL est en charge de ces sources (fabrication, maintien en conditions opérationnelles, maintenances préventives et correctives, évolutions techniques).

DIAGNOSTICS OPTIQUES

IDIL fournit également plusieurs systèmes de contrôle et de diagnostics pour le LMJ, qui vont permettre par exemple de s'assurer de la qualité des impulsions tout au long de leurs propagations vers la sphère d'expérience (analyse de forme temporelle IR - 1ω & UV - 3ω), de réaliser des pointés d'alignement, de synchroniser des diagnostics (marquage optique UV) ou encore de mesurer de très hautes vitesses (PDV/VISAR).



High Speed Scan (PDV et VISAR)

INGÉNIERIE PHOTONIQUE

De nombreux projets de développements, d'améliorations et évolutions de fonctions optiques du LMJ sont menés au sein de la division Ingénierie d'IDIL. Par exemple sur des sujets d'instrumentation pour l'étude des vieillissements des fibres ou d'autres éléments optiques.

Nous sommes fiers de contribuer à la mise en œuvre d'un grand instrument aussi exceptionnel que le LMJ. ●

CONTACT

IDIL Fibres Optiques
Boris PEDRONO, Sales Manager
info@idil.fr

grand champ de vue (FOV), les différences de point de vue entre les pixels peuvent aussi être exploitées. Ainsi, pour chaque point d'illumination et pour chaque pixel, les ellipsoïdes qui indiquent des positions probables d'objets diffusants la lumière vont s'entrecroiser et un traitement de cette image calculée permettra de reconstruire la scène située hors du champ de vue de la caméra.

Depuis cette publication fondatrice, leur nombre ne cesse de croître et le champ des possibles augmente. Les caméras ont fait d'énormes progrès -en termes de résolution et de précision temporelle- et les algorithmes de reconstruction (figure 4) se sont diversifiés au point d'offrir tout un panel de solutions de plus en plus rapides [2]. Les progrès qui nous attendent en termes de capacité et de rapidité de calculs permettent d'espérer des applications NLOS en temps réel dans la décennie à venir.

Les possibilités d'applications sont nombreuses, aussi bien pour les applications civiles que pour les applications militaires. Les voitures à conduite autonome disposent déjà de systèmes LIDAR pour l'imagerie directe et pourraient éventuellement être un jour équipées de SPAD pour voir les zones cachées dans les intersections. Pour les militaires, les forces spéciales ou autres forces d'intervention, les applications sont évidentes. Mais de nombreuses autres possibilités autour de ce principe sont explorées, aussi bien avec une approche active que passive. Sans même utiliser le temps de vol, les chercheurs de l'ISL ont démontré la possibilité de suivre un objet en mouvement caché de la vue directe et utilisant une caméra classique [3].

L'imagerie sans visibilité directe pourrait aussi un jour aider les équipes de secours, les pompiers et les robots autonomes dans les environnements à visibilité réduite (fumée, brouillard, pollution...). En effet, de nombreux travaux sont en cours pour améliorer la perception dans les milieux diffusants [4].

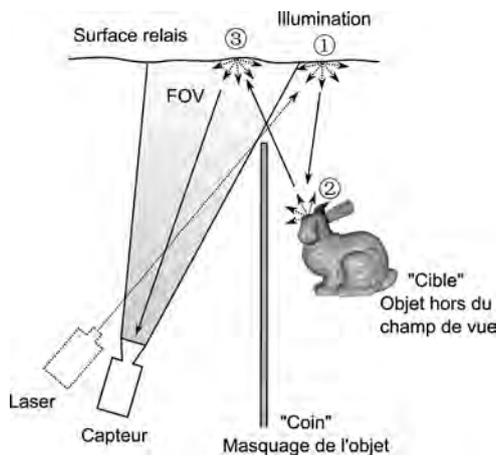


Figure 3. Principe du «see around the corner»

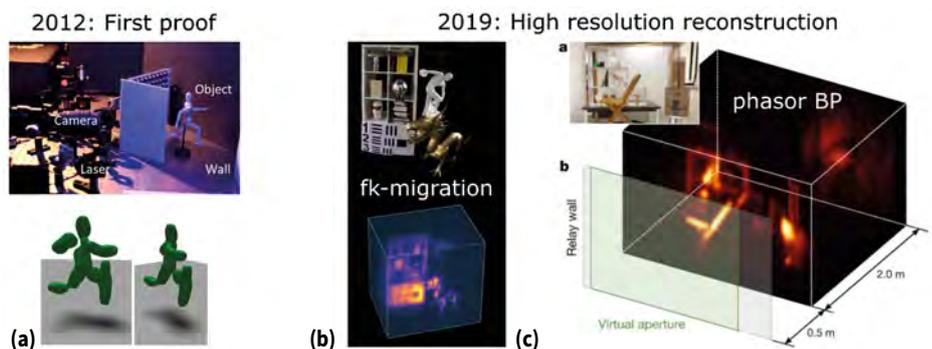
Mesure de cavités sur la Lune

Aujourd'hui, la planète Mars est devenue le nouvel horizon de la conquête spatiale, mais on sait d'ores et déjà que cette aventure ne sera possible qu'en envisageant la construction de bases de vie pérennes sur la Lune. Les scientifiques ont déterminé que pour y vivre longtemps, à l'abri des rayonnements cosmiques mortels ou des chutes de micrométéorites, l'endroit idéal serait d'utiliser les cavités ou les grottes lunaires issues du volcanisme primitif lorsque la Lune était encore en formation.

De nombreuses missions ont déjà répertorié des centaines de cavités à la surface de la Lune, laissant entrevoir des volumes souterrains plus ou moins grands, mais il est très difficile de se faire une idée du volume total et de la forme de la grotte. Les chercheurs de l'ISL ont eu une idée originale pour résoudre ce problème : à partir d'un satellite en rotation autour de la Lune, on pourrait diriger un faisceau laser pulsé à l'intérieur de ces cavités. Lorsque le faisceau laser touche les parois de la cavité, il se réfléchit dans tout le volume, puis chacun des rayons se réfléchit à son tour dans toutes les directions de l'espace. En observant le trou d'entrée à l'aide d'une caméra SPAD, les chercheurs de l'ISL ont trouvé une corrélation entre le battement temporel du signal lumineux et le volume de la cavité, ce qui permettrait de faire une première classification des cavités lunaires avant d'essayer de mieux les cartographier [5].

La figure 5 décrit le principe de la méthode. En 5a, on peut voir l'exemple d'un cratère d'effondrement bien connu sur la Lune (Mare Tranquillitatis Hole ou MTH) et qui donnerait accès à un ancien tube de lave lunaire. On ne connaît pas sa dimension exacte, mais il serait susceptible d'accueillir la construction d'une ville. En 5b, le montage expérimental testé sur des sphères ou une pièce d'un volume de quelques litres à plusieurs m³ et en 5c, le signal lumineux temporel que l'on peut observer à l'entrée de la cavité, une fois

Figure 4. Un exemple d'évolution de la qualité de reconstruction de scènes NLOS ces dernières années, a) [1], b) D.B. Lindell et al., "Wave-based non-line-of-sight imaging using fast fk migration," ACM ToG (2019), c) X. Liu et al., Non-line-of-sight imaging using phasor-field virtual wave optics, Nature (2019).



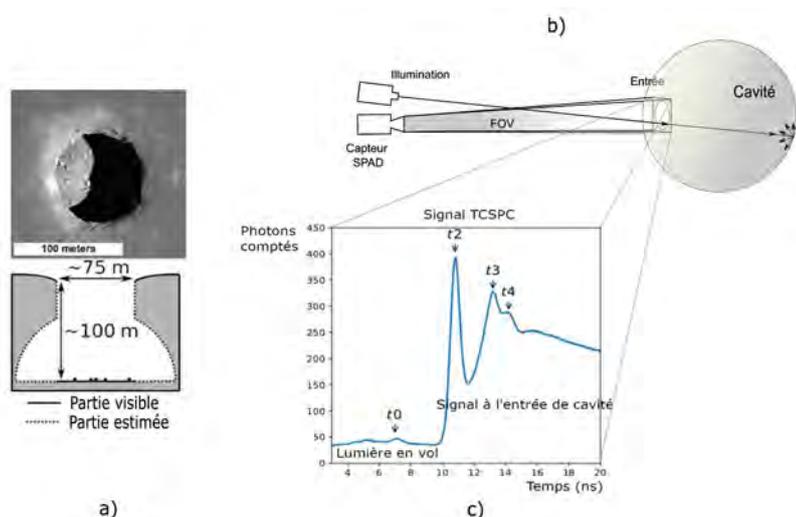


Figure 5. Principe de la mesure de volume de cavité sur la Lune

que le faisceau laser y est entré et s'y est réfléchi à de multiples reprises. Il a été démontré que l'analyse temporelle des pics de lumière permettait une estimation fiable du volume de la cavité et plus globalement de sa forme (plutôt sphérique, demi-sphérique, cubique...). Ce premier classement des cavités connues en terme de taille permettrait ensuite une analyse plus fine, pourquoi pas avec des techniques de NLOS, des meilleurs candidats pour la construction d'une base pérenne.

CONCLUSION

Les premiers résultats d'utilisation de caméras SPAD sont spectaculaires, mais attention toutefois à ne pas s'enflammer trop vite. Même si certaines publications montrent des performances étonnantes, comme

du NLOS au-delà du km ou des reconstructions de scènes avec des précisions permettant d'imager le mobilier dans un bureau, les degrés de maturité des systèmes restent très bas et les temps d'acquisition des données et de reconstruction de l'espace occulté restent très longs. Nous n'en sommes qu'au début de cette révolution, mais il est certain que les progrès attendus dans les domaines des capteurs SPAD et des calculateurs du futur ne feront qu'augmenter l'intérêt pour cette technique et étendront ses possibilités d'application, le but visé restant de pouvoir faire des images exploitables en terme de reconnaissance et d'identification de la menace hors du champ de vue, en temps réel et à des distances les plus grandes possibles. ●

RÉFÉRENCES

[1] A. Velten *et al.*, Nat. Commun 3, 745(2012), <https://www.youtube.com/watch?v=JWDocXPY-iQ>
 [2] T. Maeda *et al.*, arXiv:1910.05613 (2019)
 [3] J. Klein *et al.*, Sci. Rep. 6, 32491 (2016).
 [4] M. Laurenzis, F. Christnacher, Opt. Express 30, 17 (2022)
 [5] F. Christnacher, M. Laurenzis, Proc. SPIE 12274 (2022)

VIDEO-COLORIMÈTRE
 POUR MESURE DE LUMINANCE
 ET DE COULEUR PAR CARTOGRAPHIE

Excellent rapport qualité/prix

Avec sa grande diversité d'objectifs, son capteur CMOS et ses filtres tristimulus de très haute qualité, le vidéo-colorimètre LMK 6 est un des produits phares de la gamme TECHNOTEAM

CARACTERISTIQUES

Capteur avec résolution de 5, 12 ou 30 millions de pixels.
 Filtrés tristimulus de haute qualité.
 Large choix d'objectifs.
 Léger et compact.

APPLICATIONS

Mesure de façades, feux, voyants, dans le domaine de l'automobile et avionique.
 Mesure de luminance et d'éblouissement en tunnel et sur route.
 Mesure en environnement virtuel (AR-VR).
 LED / SSL ...

ScienTec c'est aussi, la distribution de :

Luxmètres,
 Photomètres,
 Chromamètres,
 Vidéo-colorimètres,
 Photogoniomètres,
 Sources de référence...

info@scientec.fr - 01 64 53 27 00 - www.scientec.fr

LES LASERS ET L'OPTIQUE ADAPTATIVE

Vincent MICHAU* et Nicolas VÉDRENNE

ONERA, Université Paris-Saclay, 92320, Châtillon, France

*vincent.michau@onera.fr



L'intégration de l'optique adaptative avec un laser, en corrigeant les aberrations optiques induites par l'atmosphère, vise à maintenir la qualité du faisceau sur de grandes distances. La combinaison de ces deux techniques présente un intérêt majeur pour la défense, notamment pour les armes à énergie dirigée et les communications optiques en espace libre. Cet article fait le point sur les développements en cours, les principaux programmes et les défis dans ces domaines.

<https://doi.org/10.1051/photon/202412646>

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'avènement du laser, c'est-à-dire d'une source puissante, de grande cohérence temporelle et/ou spatiale a laissé très rapidement entrevoir la possibilité de transporter puissance et information en espace libre sur de grandes distances.

Dans le domaine militaire, le dépôt d'énergie à distance a été la première application considérée. Néanmoins, que ce soit pour alimenter en énergie un système déporté, pour l'éblouir, l'endommager, voir le détruire, la présence de l'atmosphère sur le trajet de propagation ne peut pas être négligée. Nous ne nous attarderons pas sur les effets non-linéaires provoqués par le milieu atmosphérique qui introduisent des bornes aux densités de

puissances en jeu. Nous nous concentrons ici sur les fluctuations spatiales de l'indice de réfraction dans l'atmosphère induites par la turbulence atmosphérique. Ces fluctuations, bien que faibles, peuvent provoquer des mouvements aléatoires des faisceaux (beam wander) et une perte de l'efficacité de focalisation (beam spreading) [1]. Ces effets deviennent significatifs aux longueurs d'onde visibles dès que la propagation dépasse quelques centaines de mètres dans la basse atmosphère. Il est donc rapidement apparu indispensable de s'en affranchir. D'intenses travaux menés sur le sujet, notamment au Lincoln Lab et à l'ONERA, ont conduit aux premiers systèmes d'optique adaptative pour l'imagerie dans les années 1980 aux Etats-Unis et 1990 en France [2,3].

OPTIQUE ADAPTATIVE ET ARME À ÉNERGIE DIRIGÉE

Dans le vide, un faisceau laser à la longueur d'onde λ , émis par une ouverture de diamètre D , a une divergence minimale de l'ordre de λ/D . En présence de turbulence atmosphérique, les fluctuations d'indices introduisent des avances et retards de phase qui modifient l'amplitude complexe de l'onde, augmentent la dimension angulaire du faisceau et réduisent la densité spatiale de puissance sur la cible. La précompensation de ces avances et retards de phase par un système d'optique adaptative (OA) à l'émission permet d'envisager une atténuation de ces effets.

Le principe de la précompensation d'un faisceau laser par OA est rappelé sur la Figure 1. L'OA corrige

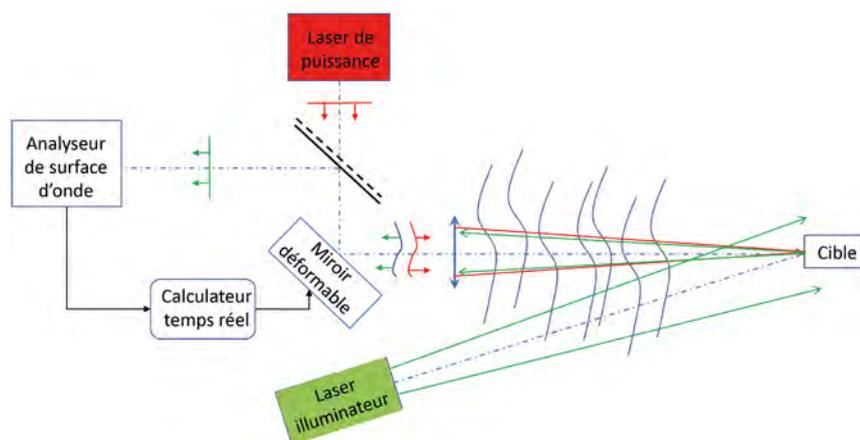
en temps réel les perturbations de la phase d'une onde. C'est un système asservi composé d'un analyseur de surface d'onde qui mesure les perturbations de la phase de l'onde à corriger, d'un miroir déformable qui applique les corrections de phase et d'un calculateur temps réel qui calcule la commande à appliquer au miroir déformable en fonction de la mesure de l'analyseur de surface d'onde délivrée. Pour effectuer la précompensation, la boucle d'OA est fermée sur une onde émise depuis la cible - on parle de cible coopératrice - ou rétrodiffusée par la cible, lorsque celle-ci est éclairée par un faisceau secondaire, dit illuminateur. Par réciprocity, le faisceau laser de puissance qui se réfléchit sur le miroir déformable se focalise au point d'où est issue l'onde utilisée pour la mesure. Les variations de chemin optique induites par la turbulence atmosphérique étant achromatiques au premier ordre, les longueurs d'onde des faisceaux illuminateurs et de puissance peuvent être distinctes et permettent une séparation optique. Cette approche permet de compenser toutes les aberrations vues par l'analyseur, pas seulement les effets de la turbulence atmosphérique. Il est également possible d'utiliser le miroir déformable pour corriger les aberrations propres du faisceau laser qui ne sont pas vues par l'analyseur de surface d'onde en effectuant un étalonnage distinct.

Dans les années 1980 et 2000, de nombreux programmes de développement d'armes à énergie dirigée avec OA ont vu

le jour, notamment aux Etats-Unis et en France. L'Airborne Laser visant à développer et à mettre en service un système d'arme laser aéroporté à haute énergie contre les missiles balistiques en phase de poussée a constitué le programme majeur aux Etats-Unis. Comme la plupart des projets d'armes laser de cette époque, il était trop ambitieux au regard des technologies disponibles et a été abandonné à l'orée des années 2000. Néanmoins, cette période a été extrêmement féconde pour l'OA puisqu'elle a permis de mettre en place, aux Etats-Unis mais également en France et en Europe, les acteurs industriels clés en mesure de proposer des briques technologiques voire des systèmes complets d'OA. Elle a également permis de faire émerger une communauté scientifique en optique adaptative qui a soutenu son développement dans de nombreux domaines applicatifs comme l'astronomie, l'ophtalmologie ou la microscopie. Ainsi, aujourd'hui, la France et l'Europe disposent d'un ensemble d'industriels qui proposent des composants ainsi que des solutions complètes en OA. On peut par exemple citer Cilas, Alpao, Imagine Optic, Safran Reosc, Microgate pour les miroirs déformables, Phasics et Imagine Optic pour les analyseurs de surface d'onde, Toptica pour les sources pour les étoiles laser, Cilas, Alpao, Imagine Optic pour les systèmes d'OA.

Depuis 2000, l'avènement de nouvelles sources laser plus facilement embarquables comme les sources laser fibrées et l'apparition de nouvelles menaces ●●●

Figure 1. Principe de la précompensation des aberrations induites par la turbulence atmosphérique à l'aide d'un système d'OA.



ILAO STAR

Mechanical
deformable
mirror
dedicated to
ultra
intense lasers

Customized to laser
parameters

Ultra-linear

Ultra-stable



www.imagine-optic.com

sales@imagine-optic.com
+33 1 64 86 15 60

imagine  optic



Figure 2. Système d'arme à énergie dirigée antidrone HELMA-P, High Energy Laser for Multiple Applications -P, développé par la société Cilas.

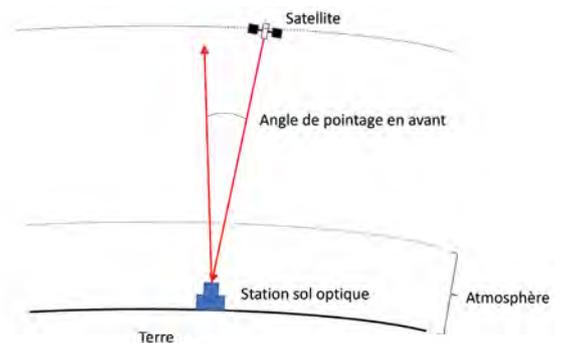
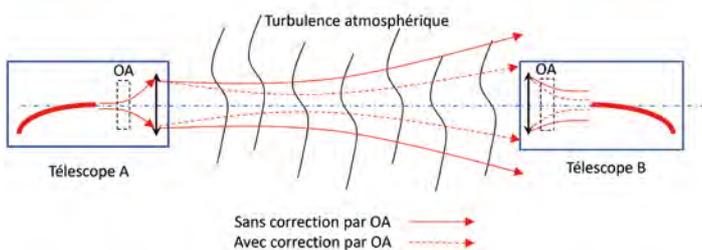
ne nécessitant pas des puissances aussi élevées comme les drones, beaucoup plus lents et plus fragiles que des missiles balistiques ont relancé l'intérêt des armes anti structures à énergie dirigée. Plusieurs systèmes sont en cours de déploiement comme le Layered Laser Defense system américain, l'Iron beam israélien, le DragonFire britannique ou Helma - P français (cf. Figure 2). Parmi ceux-ci, le Layered Laser Defense system est le premier à intégrer un système d'optique adaptative pour s'affranchir des effets de la turbulence atmosphérique.

L'application de l'OA aux armes à énergie dirigée est toutefois limitée par plusieurs restrictions à l'application de la réciprocité et de la précompensation.

La première limitation concerne le pointage. En effet, le faisceau illuminateur étant soumis aux effets de la

turbulence, il subit des déplacements aléatoires sur la cible. Si la cible est résolue, le laser de puissance peut subir ces mêmes déplacements. Plusieurs approches ont été proposées pour s'affranchir de ce problème. La plus générale consiste à éclairer la totalité de la cible et à stabiliser le faisceau sur cette image. Cette solution trouve ses limites lorsque la source est plus grande que le domaine isoplanétique des aberrations induites par la turbulence atmosphérique.

Figure 3. Principe d'un lien optique en espace libre. Lien horizontal dans la basse atmosphère (gauche). Lien sol-satellite (droite).



Lorsque la cible se déplace par rapport à la ligne de visée, la cible elle-même ne peut plus être utilisée. Il est nécessaire de pointer le faisceau laser en avant de la position apparente de la cible en raison de la vitesse limitée de la lumière. Par exemple, dans le cas d'un satellite en orbite basse visé depuis le sol, l'angle de pointage en avant peut atteindre la dizaine de secondes d'arc. Cet angle est trop élevé pour que les aberrations induites par la turbulence atmosphérique vues par le faisceau montant et celles vues par le faisceau descendant puissent être considérées comme identiques, du moins dans le domaine visible. Les concepts d'étoile laser (Rayleigh puis Sodium) et de tomographie ont été imaginés afin de s'affranchir de l'absence de source dans la direction d'intérêt et d'estimer la surface d'onde à précompenser dans une direction quelconque [2]. Ces concepts sont aujourd'hui principalement développés pour l'observation astronomique. Il faut toutefois souligner qu'ils ne donnent pas accès aux aberrations de basculements et de focalisation de l'onde et que la complexité de leur mise en œuvre limite leur emploi à des systèmes ambitieux.

Une autre difficulté apparaît lorsque la distance de propagation dans l'atmosphère turbulente devient trop élevée. Dans ce régime, dit des fortes perturbations, l'amplitude de l'onde est fortement modulée et des dislocations de sa phase peuvent apparaître. Ces dislocations qui se traduisent par des sauts de 2π sur la phase sont chromatiques. Dans ce régime, on montre que l'efficacité de la précompensation pour la focalisation diminue. Par ailleurs,

les analyseurs de surface d'onde et les miroirs déformables développés initialement pour des aberrations achromatiques et des surfaces d'onde continues ne sont plus adaptés.

COMMUNICATIONS OPTIQUES

Les communications optiques en espace libre font également l'objet de développements très actifs pour les applications civiles comme militaires depuis plusieurs décennies. En effet, la fréquence et les technologies développées pour les liens en optique guidée permettent d'envisager des débits inaccessibles avec les fréquences radios. Par ailleurs, la faible longueur d'onde autorise des faisceaux de grande directivité difficiles à intercepter (des liens discrets). Cette directivité limite de fait d'éventuels problèmes d'interférences et réduit la puissance nécessaire à l'émission.

La Figure 3 présente le principe d'un lien optique en espace libre. Dans le cas d'une communication à haut débit, le signal optique à l'émission comme à la réception est transporté par une fibre optique monomode. Le faisceau optique émis par le télescope A est collecté par le télescope B. En présence de turbulence atmosphérique, la puissance transmise de fibre à fibre peut être affectée, de même que le débit de données qui en dépend. D'une part, le beam wander et le beam spreading peuvent réduire et faire varier la puissance collectée par le télescope B, d'autre part, les éventuelles fluctuations spatiales de la phase de l'onde incidente sur le télescope B peuvent dégrader le couplage de l'onde dans la fibre au foyer du télescope B, et introduire une autre source d'atténuation moyenne et d'évanouissement du signal.

L'utilisation de sources lasers plus puissantes permet de s'affranchir des atténuations moyennes. Différentes solutions, physiques ou numériques existent également pour s'affranchir des effets des évanouissements. Néanmoins, ces solutions présentent des contraintes de mise en œuvre. L'utilisation d'OA peut être préférée.

Ainsi, une OA placée dans le télescope A peut précompenser les effets de beam wander et beam spreading de la même façon qu'avec une arme à énergie dirigée. Parallèlement, comme en astronomie, une OA placée dans le télescope B peut permettre d'aider au couplage du faisceau dans la fibre optique placée au foyer. Cette double implantation appelle plusieurs remarques. Tout d'abord, si on considère un faisceau se propageant de B vers A, les rôles des OA sont inversés. Cette dualité trouve son origine dans le principe de réciprocité. Ensuite, l'implantation d'OA est très dépendante de la géométrie du dispositif et de la répartition de la turbulence le long du trajet. Enfin, ces optiques adaptatives souffrent de plusieurs limitations déjà évoquées pour les armes à énergie dirigée. En effet, le pointage par lui-même ne pose pas de difficulté, puisque la cible est coopératrice. En revanche, si le télescope B se déplace par rapport à la direction de visée du télescope A, le pointage en avant constitue toujours un problème pour la mesure des perturbations. Par ailleurs, les discontinuités de phase sont à gérer lorsque les perturbations sont très fortes.

Des développements sont en cours pour disposer de stations optiques sol pour les liens sol-satellites à très haut débit (cf. Figure 4). Certaines, notamment dans le cas de liens avec des satellites géostationnaires, intégreront des OA. Les perturbations atmosphériques étant proches du sol, en regard de la distance de propagation, une OA unique dans la station sol est suffisante. Dans le cas du lien montant, l'erreur spatiale due à l'anisoplanétisme est l'erreur principale de correction, le principe de réciprocité n'étant pas exactement vérifié du fait du pointage en avant.

L'intérêt de l'optique pour les communications ne se limite pas aux liens sol-satellites. Des liens optiques sont également envisagés entre le sol et des plates-formes aéroportées, en particulier des drones, voire entre plates-formes aéroportées, marines ou sous-marines [4].

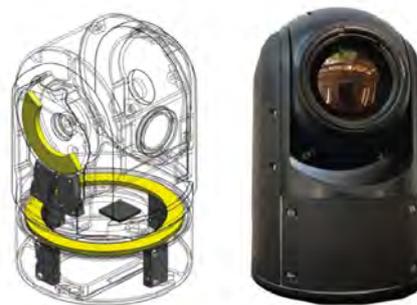
PRO-LITE
TECHNOLOGY

Du mouvement pour l'optronique

La photonique est un secteur très important pour la défense, particulièrement lorsqu'elle est associée à l'électronique pour former l'optronique.

Si l'optronique est si indissociable du secteur de la défense, c'est que les ingénieurs ont su adapter des équipements optiques pour les rendre miniatures, portables et robustes.

Le mouvement est omniprésent dans l'optronique pour la défense, stabilisations actives, systèmes d'autofocus ou mouvement angulaire.



Chez Pro-Lite, nous fournissons du mouvement pour les équipements optiques. Grâce à la technologie piézo-céramique de Nanomotion, nous équipons le secteur optronique européen avec des modules de déplacements compacts, légers et fiables.

La technologie de Nanomotion permet une grande compacité, une consommation électrique limitée et une très grande précision. Pour l'imagerie thermique, les autofocus ou les tourelles optiques, il y a un intérêt à gérer le mouvement grâce à un moteur Nanomotion. ●

CONTACT

Pierre CLAUDEL
pierre.claud@pro-lite.fr
+33 (0)5 47 48 90 70



Figure 4. Exemples de stations optiques sol : TILBA-OGS, solution industrielle proposée par la société Cailabs (gauche), FEELINGS, plateforme de démonstration expérimentale développée par l'ONERA (droite).

Dès 2006, la société AOptix faisait la démonstration d'une communication optique à 80 Gb/s sur 1,5 km entre un ballon et le sol avec une OA à la réception. Aujourd'hui, des liens horizontaux ou quasi-horizontaux dans la basse atmosphère sont envisagés sur des distances qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de kilomètres. Des approches nouvelles sont développées pour adapter l'OA au régime de fortes perturbations qui caractérisent ces propagations. Le contrôle n'est plus effectué sur une mesure dérivée de la surface d'onde mais directement par optimisation du signal d'intérêt. La précompensation est réalisée avec des composants actifs à même de créer des champs présentant des discontinuités de phase comme par exemple le miroir déformable segmenté (MEMs) proposé par Boston MicroMachines Corporation, ou bien un multiplexeur optique associé à un circuit photonique intégré [5].

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le laser constitue une solution très prometteuse pour la dépose d'énergie à distance ou la transmission de données à haut débit et sécurisée, si l'influence du milieu de propagation peut être corrigée par optique adaptative. Du fait de l'accroissement des puissances accessibles et de l'apparition de menaces relativement vulnérables, la neutralisation de cibles par laser connaît un regain d'intérêt. De premiers systèmes émettant des puissances de l'ordre de 100 kW avec optique adaptative sont actuellement déployés. Dans le domaine

des communications, les liaisons optiques satellite-sol haut débit avec optique adaptative sont en passe de devenir réalité.

La compaction des sources et des dispositifs de correction, notamment grâce aux technologies issues de la microélectronique, permet d'envisager dans les décades à venir des usages de plus en plus mobiles avec leur corollaire de défis à relever.

Un premier défi est l'extension des domaines d'emploi de ces dispositifs. Ainsi, la transmission de données et le dépôt d'énergie dans la basse atmosphère lorsque les terminaux et les cibles sont rapidement mobiles, impliquent d'aborder les questions du déplacement rapide de la direction du faisceau et celle des fortes perturbations. Pour ce faire, la capacité à

piloter des modes du champ perturbé est une piste prometteuse. La prise en compte d'objets de grandes dimensions et de géométrie évolutive sont deux autres problèmes plus spécifiquement liés à la dépose d'énergie.

Le second défi est leur usage dans des environnements sévères et rapidement évolutifs. Le déploiement des solutions évoquées est conditionné par la perspective d'une opération automatisée, robuste et fiable de dispositifs complexes et sensibles. Il s'agit d'une part d'adapter la correction aux conditions d'opération, d'autre part de donner une prédiction précise de ses performances. L'arrivée de l'Intelligence Artificielle laisse entrevoir des pistes pour résoudre ce défi. D'une part, l'utilisation du reinforcement learning pourrait permettre d'adapter les paramètres de la correction à un environnement d'opération évolutif. D'autre part, l'accélération des outils de prévision météorologique couplés à des outils d'évaluation de performance fiables devrait répondre au besoin de prédiction. ●

RÉFÉRENCES

- [1] R. L. Fante, *Proceedings of the IEEE* **63**, 1669 (1975)
- [2] D. P. Greenwood, C. A. Primmerman. *Lincoln Laboratory Journal* **5**, 1 (1992)
- [3] G. Rousset, J. C. Fontanella, P. Kern *et al.*, *Astron. Astrophys.* **230**, L29-L32 (1990)
- [4] S. Kumar, N. Sharma, *J. Phys.: Conf. Ser.* **012011** (2022)
- [5] V. Billault, J. Bourderionnet, J. P. Mazellier, *Opt. Express* **29**, 33134 (2021)

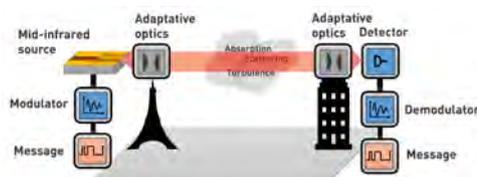
ESSOR DES COMMUNICATIONS OPTIQUES EN ESPACE LIBRE

Frédéric GRILLOT^{1,*}, Salvatore PES²

¹ Institut Polytechnique de Paris, Télécom Paris, 19 place Marguerite Perey, 91120 Palaiseau, France

² III-V Lab, 1 Av. Augustin Fresnel, 91767 Palaiseau, France, France

*frederic.grillot@telecom-paris.fr



<https://doi.org/10.1051/photon/202412651>

L'essor des communications en espace libre transforme notre façon de partager l'information. La photonique moyen infrarouge y joue un rôle essentiel, permettant des échanges plus rapides et sécurisés, et ouvrant ainsi de nouvelles perspectives passionnantes pour les liaisons optiques.

UN PEU D'HISTOIRE

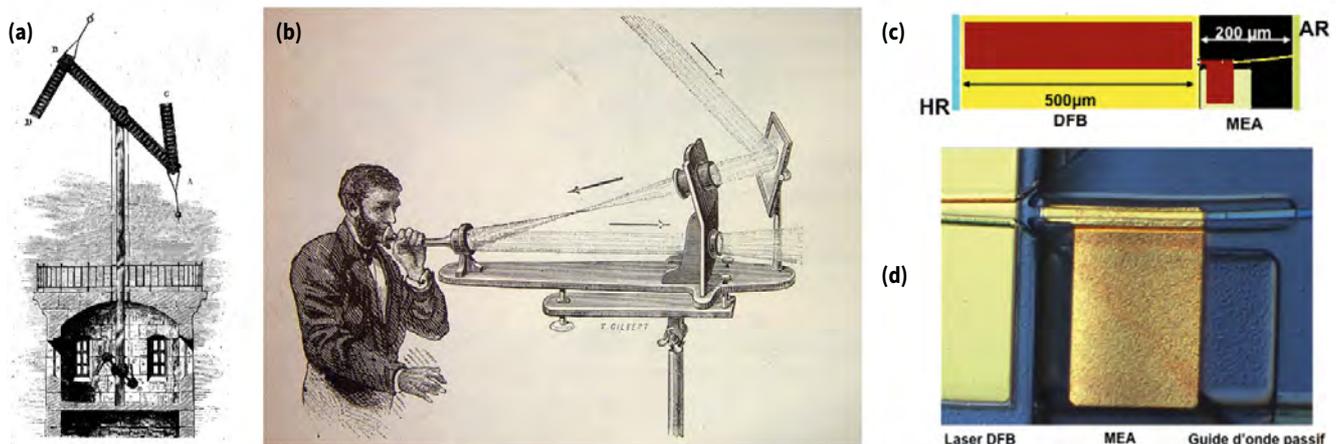
Les origines des communications optiques remontent à l'Antiquité, lorsque les gens échangeaient des informations à l'aide de signaux émis par des feux au sommet des montagnes ou à l'aide d'un phare. Au 18^e siècle, Claude Chappe, pionnier des télécommunications, a inventé le télégraphe aérien, un réseau de tours équipées de bras mobiles permettant de transmettre des messages via des positions codées (Figure 1a). Ce système a été largement utilisé

en France avant d'être remplacé par le télégraphe électrique. À la fin du 19^e siècle, Alexander Graham Bell a introduit le photophone (Figure 1b), un appareil révolutionnaire utilisant la lumière pour transmettre

des informations sonores sans fil. Le photophone modulait la lumière du soleil à travers un miroir vibrant, convertissant les vibrations sonores en variations d'intensité lumineuse. Ces variations étaient ensuite détectées par un récepteur à distance, ce qui permettait de reproduire le signal sonore. Le photophone a ainsi posé les fondations des technologies de communication optique modernes.

Au départ, la lumière se propageait principalement en espace libre, mais dans les années 1960, ●●●

Figure 1. (a) Illustration du télégraphe de Chappe ; (b) principe du photophone inventé par Graham Bell ; (c) modulateur à électro-absorption (MEA) intégré directement avec un laser à réaction distribué (DFB) ; (d) Image du composant correspondant (Source : III-V Lab).



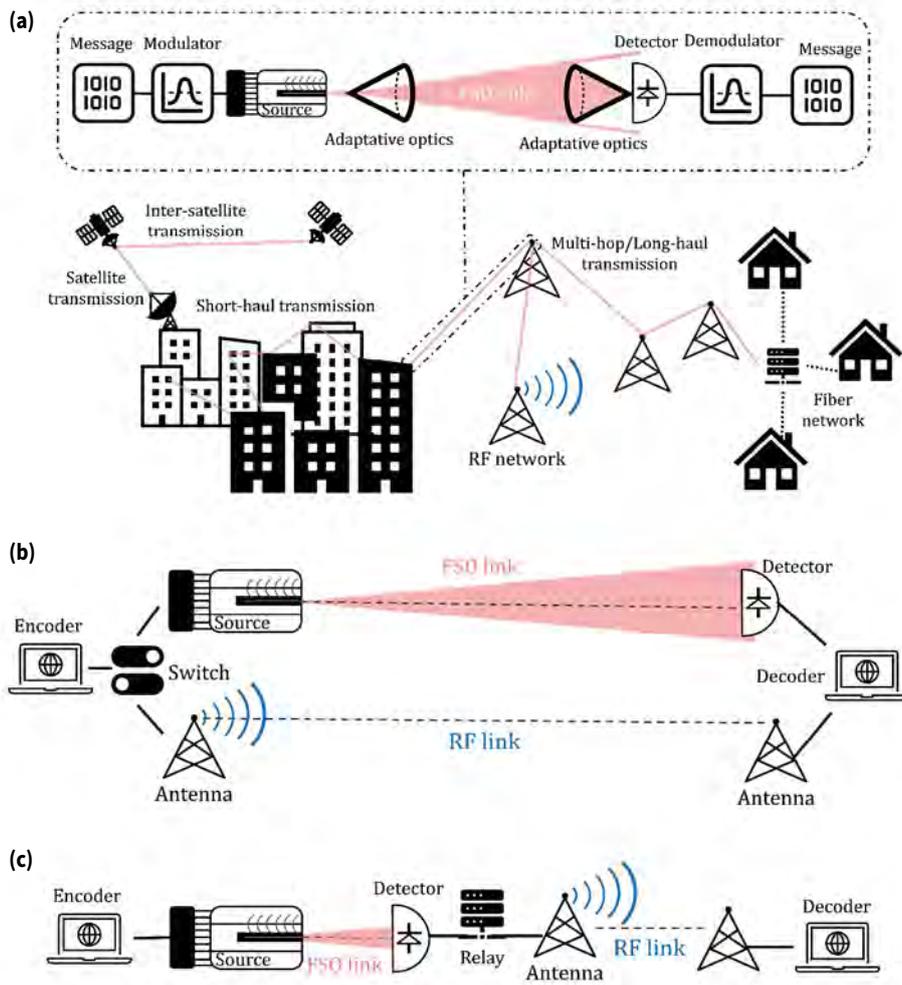


Figure 2. (a) Configuration d'un système FSO montrant la mise en œuvre différenciée, de la transmission à courte distance entre bâtiments à la communication entre le sol et le satellite. Les composants fondamentaux du système FSO sont illustrés ; (b) liaison à double saut qui incorpore à la fois les technologies RF et FSO ; (c) liaison hétérogène qui utilise à la fois les technologies FSO et RF. Credit : Pierre Didier, Thèse de Doctorat, Télécom Paris (2024)

Charles Kao et George Hockham ont révolutionné ce concept en proposant l'utilisation de fibres de verre pour guider la lumière avec de faibles pertes, ouvrant ainsi la voie à la transmission de données par fibre optique. Cependant, la fabrication de verre de haute qualité posait un problème, et ce n'est que dans les années 1970 que Corning a réussi à produire du verre de meilleure qualité, permettant ainsi le déploiement massif des fibres optiques. En 1976, AT&T a installé le premier système expérimental de fibre optique à Atlanta, utilisant

une diode laser à modulation directe. Cependant, cette technologie a rapidement rencontré des limitations en matière de bande passante et de stabilité en fréquence du laser. Dans les années 1970, la modulation externe de la lumière s'est imposée comme une solution beaucoup plus efficace. À partir des années 1980, des modulateurs à électro-absorption (EAM) intégrés directement avec des diode lasers monomode (DFB) ont vu le jour (Figure 1c), améliorant considérablement les performances des systèmes commerciaux. Aujourd'hui, bien que

l'utilisation de la fibre optique soit la méthode de communication la plus performante, elle reste néanmoins coûteuse en termes d'infrastructure et de maintenance, limitant son accessibilité dans les régions à faible densité de population.

LES COMMUNICATIONS EN ESPACE LIBRE

Les systèmes de communications en espace libre utilisent des signaux optiques ou radios pour transmettre des informations dans l'air ou dans le vide, sans support physique. Après la découverte des ondes radio par Heinrich Hertz au 19^e siècle, Guglielmo Marconi a réalisé en 1901 une transmission historique entre Terre-Neuve et l'Angleterre. Cet exploit a marqué une avancée majeure dans les communications sans fil et a ouvert la voie à aux communications radios longue distance. Aujourd'hui, l'utilisation des radiofréquences (RF) est essentielle pour de nombreuses applications allant de la radiodiffusion à l'internet sans fil en passant par les réseaux mobiles. Les bandes RF de 1 GHz à 100 GHz sont la norme pour les réseaux 4G et 5G. Néanmoins, les systèmes RF proposent des débits limités (100-1000 Mbit/s) et nécessitent l'obtention de licences pour les bandes de fréquence en raison des interférences électromagnétiques. De plus, les débits diminuent avec la densité des utilisateurs et les conditions atmosphériques défavorables.

En revanche, l'optique offre une solution prometteuse pour le développement de systèmes en espace libre à haut-débit, à faible coût et nécessitant une infrastructure minimale. En effet, les liaisons optiques en espace libre (FSO) sont capables de transmettre des informations sur des distances variant de quelques centaines de mètres à des dizaines de milliers de kilomètres, ce qui les rend adaptées à diverses applications terrestres, aériennes, spatiales et inter-satellites

(figure 2a). Un système FSO utilise une source optique modulée (diode laser) dont le faisceau est corrigé par de l'optique adaptative afin de compenser les turbulences atmosphériques. Le signal traversant l'atmosphère, est reçu par un détecteur et démodulé pour récupérer l'information transmise (figure 2a). Les systèmes FSO actuels exploitent les longueurs d'onde du visible et du proche infrarouge. Le signal optique émis par le laser étant directionnel, il est naturellement discret, ce qui le rend difficile à détecter. Enfin, les systèmes FSO ont une meilleure efficacité énergétique et peuvent être déployés rapidement et à moindre coût, même dans des environnements complexes.

Pour assurer une communication sans faille, même dans des conditions difficiles, un système hybride tirant parti du mariage des technologies FSO et RF constitue bonne alternative. Dans les cas où la communication est interrompue en raison d'obstacles ou de conditions météorologiques défavorables, le système peut alors commuter de l'optique vers la RF, assurant ainsi une connexion ininterrompue (figure 2b). Bien que les liaisons RF puissent également être affectées par des phénomènes atmosphériques, elles sont souvent moins susceptibles d'être influencées par ces conditions, en particulier à des fréquences plus basses. Pour pallier à ce problème, le système FSO peut être utilisé, dans certaines conditions, comme méthode de communication principale, tandis que le système RF sert de relais en cas de perturbation ou de conditions météorologiques défavorables susceptibles de limiter le débit (figure 2b). Un système FSO/RF trouve des applications dans divers domaines, notamment les communications militaires, les réseaux cellulaires et l'accès à l'internet à haut débit dans les zones urbaines. Sa capacité à fournir des communications à large bande et son adaptabilité à différentes conditions environnementales en font un choix privilégié dans les scénarios où la fiabilité et la continuité de la connectivité sont primordiales. Une troisième approche

pourrait être envisagée, où les données sont d'abord transmises via une liaison FSO (Figure 2c). Cependant, pour surmonter les limitations des liaisons FSO telles que la nécessité d'une communication en visibilité directe, la transmission RF est utilisée pour le dernier tronçon de la communication, permettant ainsi de transmettre les données à l'utilisateur final.

La sélection des longueurs d'onde appropriées pour les systèmes FSO repose sur les fenêtres de transparence de l'atmosphère (Figure 3a), qui sont des zones où l'absorption atmosphérique est minimale. Ces fenêtres de faible absorption sont déterminées par la composition moléculaire de l'air. L'absorption des photons par les molécules atmosphériques provoque des transitions électroniques vers des niveaux d'énergie électronique vibrationnelle ou rotationnelle plus élevés, avec des transitions spécifiques dépendant de la molécule. Il existe plusieurs bandes de faible absorption dans le spectre infrarouge. Notamment, les longueurs d'onde du proche infrarouge autour de 1,55 microns (SWIR) mais aussi la fenêtre du moyen infrarouge (MIR) entre 3 et 5 microns (MWIR), et entre 8 et 14 microns (LWIR). La disponibilité de transmetteurs et de détecteurs de haute qualité fonctionnant dans la fenêtre du proche infrarouge fait de la longueur d'onde optique de 1,55 microns un choix naturel pour les systèmes d'optique en espace libre. Une équipe internationale a récemment accompli une démonstration remarquable dans le domaine de la transmission en espace libre à cette longueur d'onde. Ils ont atteint une vitesse de transmission record de 1 Tbit/s sur une distance de 53 km, avec un dénivelé d'environ 2900 mètres (Figure 3b) [1]. Cette prouesse a été accomplie grâce à un mélange astucieux de techniques alliant détection cohérente, amplification optique, multiplexage en longueur d'onde, optique adaptative, ainsi que de la correction d'erreur. Enfin, la photonique silicium permet aujourd'hui de développer des compensateurs de turbulence efficient à 1,55 microns. La mise en œuvre d'un tel système est ●●●

25 + 26 September 2024
 Jena, Germany

Visit us!
Marketplace for High-tech innovations

 Optics, photonics,
 electronics & mechanics

w3-fair.com

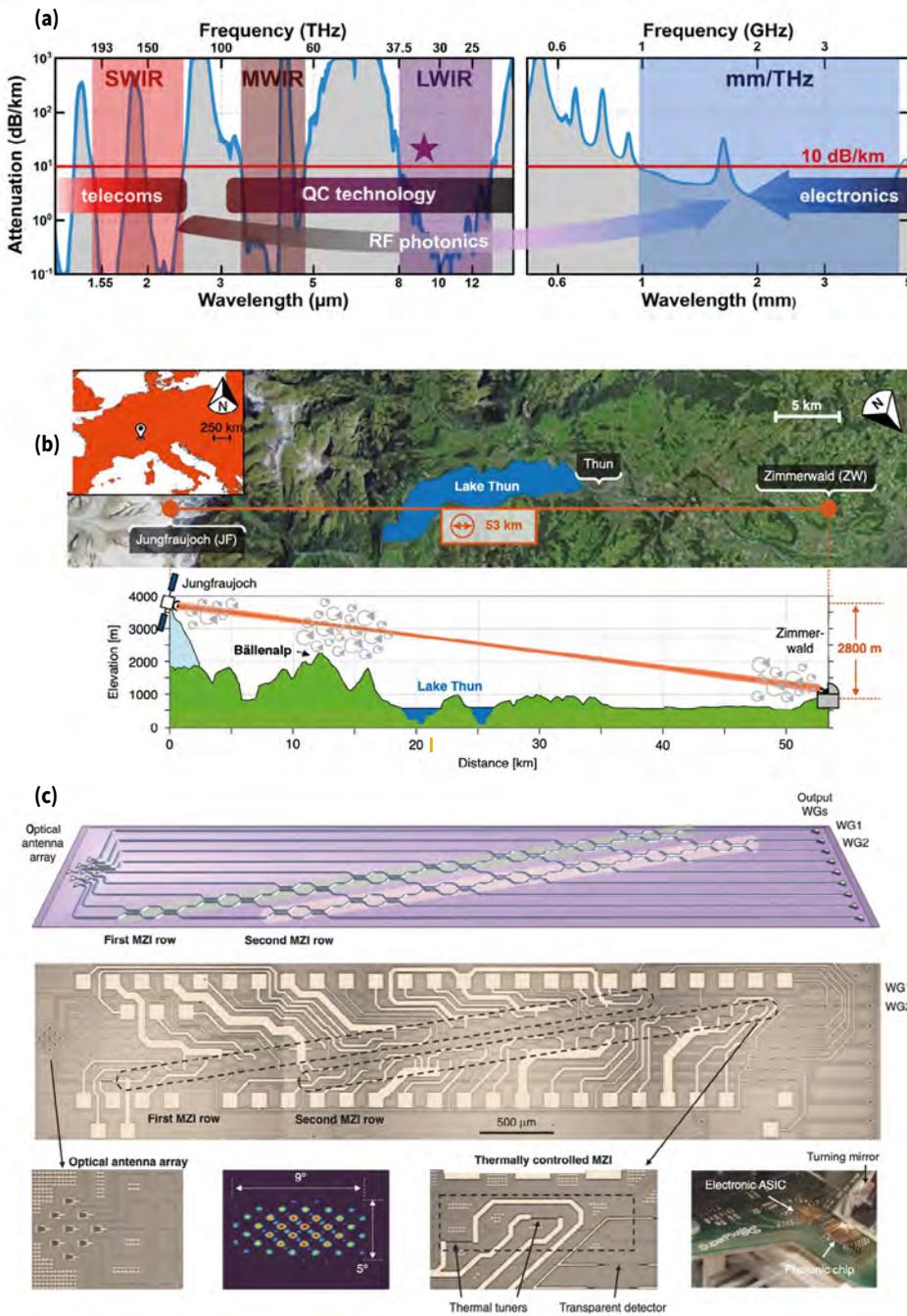


Figure 3. (a) Atténuation atmosphérique en fonction de la longueur d'onde, calculée pour une propagation horizontale à niveau du sol et un taux d'humidité de 50% (Source : HITRAN). Les différentes fenêtres de transmission sont indiquées ; (b) Topographie de la liaison FSO de 53 km avec turbulence ainsi qu'une vue aérienne de l'expérience et du profil d'élévation correspondant [1] ; (c) Photo du processeur photonique pour la compensation de la turbulence atmosphérique [2].

constituée d'un maillage d'interféromètres Mach-Zehnder accordables directement intégrés sur un circuit silicium (Figure 3c). L'algorithme de compensation du signal associé au processeur photonique permet

de restaurer la puissance du signal optique même en présence de fortes turbulences, ce qui constitue une avancée prometteuse pour le développement des liens FSO dans la région du SWIR [2].

LA PHOTONIQUE MOYEN INFRAROUGE

Dans le cas de liaisons soumises à des conditions météorologiques variables ou dégradées, la transmission du signal dans la gamme spectrale du MWIR et du LWIR présente des avantages significatifs [3, 4]. Ces longueurs d'onde offrent une résilience accrue par rapport au SWIR et aux ondes RF, ce qui se traduit par une meilleure disponibilité du canal de communication. En effet, ces grandes longueurs d'onde sont moins sensibles à la diffusion causée par les aérosols et les turbulences atmosphériques, ce qui permet une transmission plus stable du signal. Cet avantage majeur s'ajoute à des potentialités inégalées en termes de furtivité grâce à la faible diffusion de Mie et la présence d'un fond continu de photons incohérents ce qui permet de noyer le signal optique dans le bruit thermique, tout en gardant des fréquences de porteuse optique compatibles avec un transfert de données à haut débit. Parmi les nouvelles applications de la photonique MIR, on retrouve notamment les communications FSO ainsi que le développement de systèmes de détection optique avancés (LiDAR). L'intérêt pour les communications optiques dans la région du MIR est apparu simultanément avec les premiers développements des lasers à cascade quantique (QCL). Ces lasers, démontrés pour la première fois en 1994, sont des dispositifs à semi-conducteurs unipolaires où l'émission stimulée se produit *via* des transitions électroniques très rapides (sub-picoseconde) entre des états d'énergie discrets de la bande de conduction (Figure 4a). Grâce à une ingénierie quantique de la structure de bande, la longueur d'onde d'un QCL peut être accordée sur une large plage spectrale, allant de 3 microns jusqu'à des centaines de microns. Ils offrent ainsi un haut degré de liberté dans la région de l'infrarouge moyen du spectre électromagnétique. Des sources QCL de

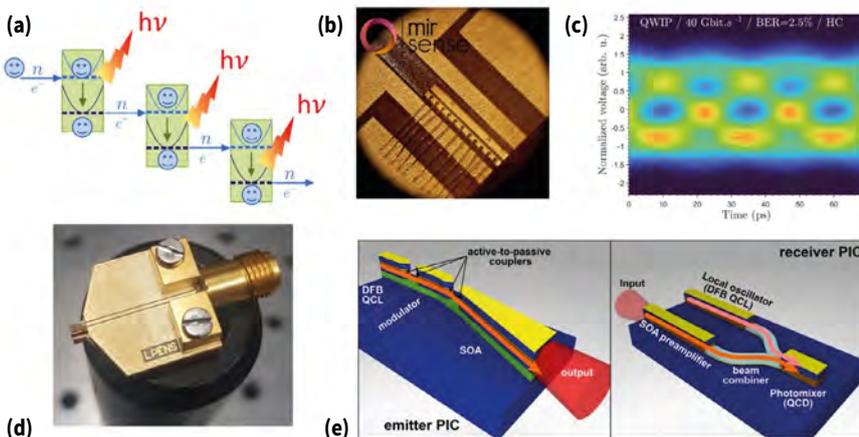
**Pôle d'Expertise Photonique :
Précision, Performance,
Innovation**

faible largeur de raie, largement accordables, et fonctionnant à température ambiante sont aujourd'hui disponibles commercialement (Figure 4b), tout en produisant une puissance de sortie allant de quelques centaines de milliwatts avec des DFB, jusqu'à plusieurs watts avec des lasers Fabry-Perot.

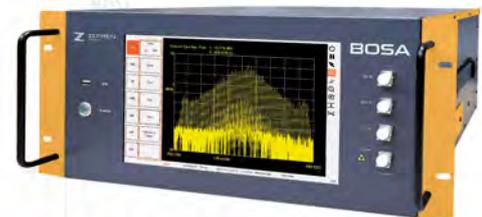
Les efforts visant au développement de solutions FSO dans le MIR suivent actuellement plusieurs approches technologiques, présentant chacun des avantages et inconvénients. On peut citer la conversion non-linéaire de fréquence SWIR-MIR, qui bénéficie de l'abondance de composants matures issus de la filière télécom, des formats de modulation classiques en phase et amplitude, et des techniques de multiplexage en longueur d'onde ou spatiale. En contrepartie, cette solution est intrinsèquement limitée par un rendement de conversion réduit et par la difficulté de miniaturisation, et donc d'intégration dans des systèmes photoniques compacts. Une deuxième approche consiste à utiliser des composants unipolaires discrets issus de la technologie à cascade quantique. Une étude récemment démontré des transmissions de données très prometteuses en associant un QCL, un modulateur Stark, et un détecteur QWIP

(Quantum Well Infrared Photodetector) dans le LWIR à 9,3 microns, mettant en évidence les potentialités de la technologie unipolaire (Figures 4c-d) [5]. Cette avancée est à la base des futurs développements visant leur intégration dans des plateformes de photonique intégrée. Mis au point plus récemment, les lasers interbandes à cascades quantiques (ICL) exploitent des transitions radiatives entre la bande de conduction et la bande de valence. Ils offrent une alternative intéressante au QCL de par leur faible consommation ainsi qu'un large choix de longueurs d'onde jusqu'à 7 μm . Des débits relativement élevés ont été récemment obtenus avec des ICL modulés directement et des photodétecteurs interbandes en cascade (ICIP) dans la fenêtre 3-5 microns [6]. Cependant, même si les avancées technologiques des sources QCL et ICL sont très encourageantes, le principal obstacle au développement des systèmes FSO/LiDAR reste fondamentalement lié aujourd'hui à un manque de briques de base complémentaires. En effet, l'absence de dispositifs photoniques commerciaux tels que des modulateurs électro-optiques de phase ou d'amplitude, des amplificateurs optiques ou des détecteurs rapides est fortement pénalisante pour le développement ●●●

Figure 4. (a) Illustration de la structure de bande d'un laser à cascade quantique ; (b) Image d'un laser QCL (Crédit : mirSense), (c) Transmission à 40 Gb/s obtenue avec un QCL, un QWIP et un modulateur Stark opérant à 9,3 microns [5]. (d) Image d'un modulateur Stark LWIR (Crédit : LPENS Paris) ; (e) Illustration artistique d'une plateforme hétérodyne pour le moyen infrarouge intégrant les concepts des circuits photoniques intégrés et des dispositifs à cascade quantique (source : projet H2020 cFLOW, <https://cfLOW-project.eu/>).



PHOTOMÈTRE
OFDR LASER EDFA
SWITCH DAS BOSA OSA DTS
COMPOSANTS FBGI
TLS VOA



INFOS www.wavetel.fr
DÉMO about.wavetel.fr



desdites applications. Ces objets manquent dans la perspective de leur co-intégration dans des plateformes de type émetteur-récepteur.

La troisième solution est effectivement celle qui s'intéresse directement au développement de la photonique intégrée MIR. Deux choix principaux sont alors possibles : d'une part l'intégration hétérogène de composants discrets dans une plateforme commune, permettant l'optimisation indépendante des différentes fonctions optiques, de l'autre l'intégration monolithique de composants dans la même plateforme, qui permettrait de bénéficier d'une miniaturisation ultime, de coûts limités et d'une fiabilité du système accrue. Ces deux approches sont schématisées dans la Figure 4^e, où les concepts de circuits intégrés photoniques sont rassemblés pour réaliser une plateforme hétérodyne dans le MIR, composée d'un émetteur et d'un récepteur intégrant les éléments de base de la technologie à cascade quantique. L'émetteur présente un schéma d'intégration hétérogène, où les briques de bases sont intégrées sur un support hôte par de techniques de collage de type « flip-chip », alors que le récepteur est basé sur l'intégration monolithique d'un oscillateur local (QCL-LO), d'un détecteur à cascade quantiques (QCD) et des fonctions de routage optique au sein de la même puce optique. Une telle approche est possible dans la filière de matériaux InGaAs/AlInAs sur InP, qui est désormais assez mature pour pouvoir envisager dès aujourd'hui la réalisation de circuits photoniques intégrés dans le MIR.

Malgré ses nombreux avantages, les liens FSO ne bénéficient pas de la protection des données assurée par la couche physique du canal de propagation. La diffusion croissante d'informations sensibles et la menace constante de la cybercriminalité obligent à rechercher des solutions ingénieuses pour garantir la sécurité des données. La distribution optique de clés quantiques (QKD)

en espace libre est une technologie prometteuse en raison du haut niveau de sécurité assuré par les propriétés intrinsèques de l'intrication quantique. Cependant, elle demeure encore limitée par les performances des appareils de transmission, qui peuvent offrir des débits limités, un rendement restreint et un coût élevé. En outre, cette technologie n'est pas encore disponible au MIR en raison de l'absence d'émetteurs et de détecteurs de photons unique. Pour pallier ces obstacles, la cryptographie par chaos est un outil très attractif pour sécuriser l'information, bénéficiant accessoirement de la furtivité accrue du rayonnement thermique. Avec ce protocole, il est possible d'intégrer un message dans une porteuse chaotique du signal émetteur. Le déchiffrement du message est réalisé grâce à la synchronisation de chaos entre deux QCL similaires, puis en calculant la différence entre la sortie synchronisée du laser récepteur avec celle du signal transmis par l'émetteur. La toute première communication cryptée par chaos a été réalisée avec dans le MWIR à 5,6 microns [7], puis très récemment dans le LWIR à 9,3 microns [8]. Cette dernière configuration peut être utilisée pour des applications où la protection du message transmis est cruciale mais où des débits de données élevés ne sont pas indispensables, comme les applications militaires ou les transmissions sol-satellite.

CONCLUSIONS

Les télécommunications optiques en espace libre représentent une alternative intéressante face à la saturation progressive des canaux dédiés aux technologies sans fil et aux exigences croissantes en matière de largeur de bande. Il existe manifestement un fort intérêt sociétal à proposer des solutions alternatives pour contrer les limitations atmosphériques et augmenter la portée des systèmes de télécommunications optiques, même dans un environnement dégradé. Les technologies optoélectroniques actuelles permettent d'envisager le développement de telles liaisons sécurisées, à haut-débit lesquelles peuvent être combinées aux systèmes de communication RF. En particulier, les progrès récents des plates-formes intégrées MWIR et LWIR permettront de faire progresser ces systèmes de communication. Il s'agira notamment d'accroître les performances en développant les communications cohérentes, de pousser l'intégration photonique et le multiplexage en longueur d'onde. La conception de nouveaux composants (modulateurs, amplificateurs, détecteurs ultrarapides) jouera un rôle essentiel. Enfin, le perfectionnement des méthodes de filtrage et l'application de techniques de correction du front d'onde pour compenser les effets de la diffusion et de la turbulence seront également nécessaires. ●

RÉFÉRENCES

- [1] Y. Horst *et al.*, *Light: Sci. Appl.* **12**, 1 (2023)
- [2] S. SeyedinNavadeh *et al.*, *Nat. Photonics* **18**, 149 (2024)
- [3] A. Delga *et al.*, *Proc. SPIE* **10926**, 1092617 (2019)
- [4] R. Martini *et al.*, *Electron. Lett.* **37**, 191 (2001)
- [5] P. Didier *et al.*, *Adv. Photon.* **4**, 056004 (2022)
- [6] P. Didier *et al.*, *Photonics Res.* **11**, 582 (2023)
- [7] O. Spitz *et al.*, *Nat. Commun.* **12**, 3327 (2021)
- [8] P. Didier *et al.*, *Optica*. **11**, 626 (2024)

LES ARMES LASER : PANORAMA ET DÉVELOPPEMENTS RÉCENTS

Christophe SIMON-BOISSON*

Thales LAS France, 2 avenue Gay-Lussac, 78995 Elancourt

*christophe.simonboisson@fr.thalesgroup.com



<https://doi.org/10.1051/phonon/202412657>

Les armes laser présentent un intérêt opérationnel avéré dans le contexte des conflits modernes. Leur développement engagé il y a plusieurs décennies a été fortement accéléré depuis une quinzaine d'années grâce à la disponibilité de nouvelles technologies (lasers à fibre, combinaison de faisceaux) et de nombreux programmes sont en cours dans le monde.

Le contexte géopolitique actuel et les conflits de haute intensité en cours mettent en exergue la nécessité de mettre en œuvre des moyens efficaces de contrecarrer la menace disruptive et grandissante des drones militaires dont le nombre va grandissant et le coût diminuant, tout en conservant des capacités au meilleur niveau pour faire face à des menaces dont la connaissance est plus ancienne comme les missiles, obus et roquettes.

Des moyens anti-aériens et anti-missiles efficaces de haute performance comme l'ASTER Franco-Italien, le PATRIOT Américain et le système Israélien de protection appelé « Dôme de Fer » sont déployés actuellement et utilisés avec succès dans les conflits en cours. Cependant, si les actions de ces moyens de protection sont très efficaces, elles sont également très coûteuses, surtout quand on compare leur coût à celui de certaines menaces ainsi neutralisées, par exemple des drones dont le coût de fabrication n'est parfois

que de quelques milliers d'Euros. En outre, la quantité de missiles anti-missiles ou anti-drones est définie par les capacités industrielles actuellement opérationnelles, et toute utilisation impacte le stock disponible de ces missiles dépendant du taux d'utilisation et de la vitesse de réassort.

Dans un tel contexte, l'utilisation du laser comme pourvoyeur d'une « énergie dirigée » en quantité suffisante pour neutraliser des menaces apparaît comme un complément très attractif aux moyens actuels, notamment du fait de coûts d'opération modestes puisqu'il n'y a pas de munitions coûteuses à renouveler régulièrement.

Les caractéristiques essentielles d'un faisceau laser pour cet usage seront d'une part sa capacité à se propager dans une direction bien définie grâce aux propriétés de cohérence de la lumière laser (c'est du fait de cette directivité des faisceaux lasers que l'on utilise couramment le terme d'« énergie dirigée ») et donc à pouvoir être concentré sur une cible à une certaine distance, d'autre part sa capacité à « transporter » une

quantité importante d'énergie qui sera de nature à échauffer la cible à différents niveaux depuis l'élévation de la température locale jusqu'au percage de la structure en passant par un stade intermédiaire pouvant être un affaiblissement structurel très important de la cible.

Les progrès considérables réalisés sur la technologie des lasers durant les décennies écoulées permettent de disposer à présent de lasers de forte puissance compacts et efficaces, capables d'être déployés sur des terrains d'opérations.

BREF HISTORIQUE DES ARMES LASER

La première démonstration expérimentale du fonctionnement d'un laser a eu lieu en Mai 1960, réalisée par Theodore Maiman dans les laboratoires de recherche de Hughes Aircraft. Si au démarrage, les applications étaient peu nombreuses, le laser étant perçu à ses débuts comme une « solution à une absence de problème », elles se sont rapidement développées dans de nombreux

domaines en particulier dans l'industrie ainsi que dans la défense. Les lasers de très forte puissance (pour les lasers continus) et de très forte énergie par impulsion (pour les lasers impulsifs) seront pendant les 3 premières décennies essentiellement les lasers à gaz (principalement les lasers CO₂ mais aussi les lasers excimères) ainsi que les lasers chimiques (au premier rang desquels le laser oxygène iode). Il est donc tout à fait logique que les premiers projets d'armes laser se soient appuyés sur ces technologies en priorité.

Ces projets d'armes laser ont été développés pour la plupart aux Etats-Unis. En France, la DGA a lancé durant les années 80, le programme LaTEX (Laser associé à une Tourelle EXpérimentale) qui a donné lieu à un démonstrateur dont les données sont classifiées.

Aux Etats-Unis, le programme le plus emblématique de cette première vague de développements est le programme ABL (pour AirBorne Laser). Ce programme démarré en 1996 avait pour objectif l'utilisation d'un laser de très forte puissance contre des missiles balistiques tactiques en phase de « boost » à plusieurs centaines de kilomètres. Le laser utilisé était un laser chimique COIL (Chemical Oxygen Iodine Laser) dont la puissance était de l'ordre d'une dizaine de MegaWatts délivrés durant des séquences de tir de 3 à 5 secondes. L'ensemble du système laser occupait la quasi-totalité d'un Boeing 747 modifié. Plusieurs essais fructueux de destruction de missiles furent réalisés, cependant le programme fut abandonné en 2011, notamment au motif que la portée effective contraignait l'avion intercepteur à devoir se positionner trop près des zones de lancement.

En parallèle, à partir du début des années 2000, des nouveaux programmes principalement basés sur l'emploi de lasers à solide ont vu le jour notamment aux Etats-Unis, bénéficiant de plusieurs révolutions technologiques dans ce domaine, en particulier le pompage par diodes

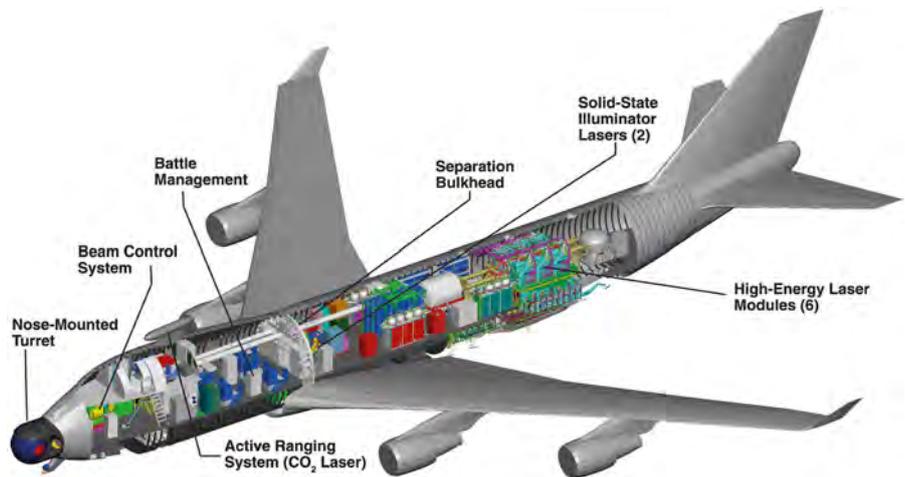


Figure 1. Synoptique système « Airborne Laser » (source : projet H2020 cFLOW, <https://cflow-project.eu/>).

laser et les lasers à fibre, présentés en détail ci-après. Les progrès les plus spectaculaires ont été réalisés pour le régime d'émission continue ce qui l'explique l'utilisation quasi exclusive de ce type de lasers dans les systèmes récemment développés ou en cours de développement.

TECHNOLOGIES LASER POUR LES SYSTÈMES MODERNES D'ARMES LASER

Le premier virage d'importance pour les lasers à solide a été l'introduction progressive du pompage par diodes à partir de la fin des années 80/début des années 90. L'utilisation de diodes laser à la place de lampes flash présente en effet de nombreuses améliorations, en particulier au niveau de l'efficacité énergétique avec la possibilité d'ajuster le spectre d'émission étroit des diodes laser à l'absorption des matériaux amplificateurs laser. Cette différence fondamentale a des conséquences sur l'encombrement, le volume et la consommation électrique du laser qui à niveau de puissance de sortie équivalente sont nettement réduits tout comme l'est le besoin en refroidissement. Le deuxième avantage très significatif des diodes laser par rapport aux lampes flash est leur durée de vie qui en régime continu est de plusieurs dizaines de milliers d'heures à comparer à un millier d'heures pour les lampes avec comme conséquence

des remplacements beaucoup moins fréquents des éléments de pompage. Dans les premiers temps du pompage par diode, leur inconvénient principal fut leur coût bien plus élevé que celui des lampes. Néanmoins grâce à des réductions de coûts résultant de l'amélioration des technologies, dès le début des années 2000, les diodes se sont substituées massivement aux lampes pour les lasers continus (à noter que la situation est très différente pour le cas impulsif, où elle est même opposée pour les lasers de classe Joule et au-delà).

La deuxième révolution technologique dans le domaine des lasers à solide est l'apparition des lasers à fibre dès la seconde moitié des années 90 et leur développement massif durant la décennie 2000. La spécificité des lasers à fibre est la possibilité de réaliser un guidage optique tant du laser proprement dit que de la lumière de pompage, permettant de confiner les faisceaux durant leur propagation sur de très longues distances ce qui a un impact direct à la fois sur l'efficacité énergétique (le rendement de conversion de la lumière des diodes en lumière laser est typiquement de l'ordre de 80 à 90%) et sur la gestion thermique avec la possibilité de réaliser le dépôt de chaleur sur un plus grand volume que dans le cas de structures non guidantes (grâce à la longueur beaucoup plus élevée) tout en le faisant de manière uniforme. Ces éléments associés conduisent donc à des effets thermiques bien moindres que dans les lasers en propagation libre tout en s'affranchissant des effets de lentille thermique qui

ont peu d'impact du fait de la propagation guidée.

L'autre avantage considérable des lasers à fibre réside dans la possibilité de réaliser des structures monolithiques soit par dépôt direct de traitements réfléchissants sur les extrémités de la fibre, soit en soudant à la fibre des composants assurant les fonctions de miroirs de la cavité laser. La réalisation de telles structures monolithiques est très favorable pour assurer le maintien des performances du laser (notamment puissance et pointé du faisceau) par rapport aux variations de l'environnement (température, vibrations, chocs) qui peuvent être importantes dans un contexte d'utilisation opérationnelle en extérieur.

Les lasers à fibre dopée Ytterbium opérant en régime continu ont été déployés massivement dans l'industrie manufacturière à partir des années 2000, en particulier pour le traitement des métaux. Les puissances atteintes sont de 10 kW pour les

lasers monomodes transverses (dont la divergence est faible, légèrement au-dessus de la limite de diffraction) et de 100 kW pour les lasers multimodes (dont la divergence est sensiblement plus élevée). Pour l'application arme laser qui nécessite la propagation sur des très grandes distances (de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres), l'utilisation de lasers monomodes est la solution privilégiée. Même en régime continu, la puissance produite est fondamentalement limitée par des effets d'optique non linéaire (notamment la diffusion Brillouin et la diffusion Raman) car le diamètre du faisceau laser dans la fibre n'est que de quelques dizaines de microns.

La solution pour s'affranchir de cette limitation physique intrinsèque est de combiner plusieurs faisceaux laser élémentaires afin d'obtenir un faisceau laser plus puissant. Il existe 2 grands types de combinaison, la combinaison spectrale et la combinaison cohérente :

- La combinaison spectrale consiste à associer des lasers à fibre ayant chacun des longueurs d'onde différentes et à les regrouper soit au moyen de miroirs à traitement dichroïque, soit au moyen d'un réseau de diffraction optimisé à cet effet. La condition pour que cette technique fonctionne correctement est que chaque laser ait une largeur spectrale très faible afin que l'ensemble des lasers émettent dans la fenêtre spectrale d'émission stimulée de l'Ytterbium. Pour ce type de laser à faible largeur spectrale, l'état de l'art actuel correspond à une puissance de l'ordre de 2 à 3 kW. Ainsi il est possible de produire par exemple une puissance de 20 kW en combinant 12 lasers de 2 kW car l'efficacité de combinaison est très élevée, typiquement de l'ordre de 90%. La combinaison spectrale est particulièrement adaptée pour des puissances n'excédant pas 100 kW
- La combinaison cohérente consiste à associer des amplificateurs ●●●



Experience innovative technologies!

Artificial intelligence, embedded vision and the tight interlocking of machine vision and automation create new possibilities - for the smart factory of tomorrow and for the steadily expanding non-industrial applications.

08 - 10 October 2024
Messe Stuttgart, Germany

www.vision-fair.de

VISION
World's leading
trade fair for
machine vision

à fibre en s'assurant qu'ils fonctionnent tous en phase. Pour ce faire, il convient donc de mettre en place un dispositif de mesure de la phase de chaque amplificateur qui permettra de générer le signal de correction à appliquer à un dispositif actif de correction de phase implanté sur chaque voie amplificatrice et de mettre en œuvre un algorithme capable de converger très rapidement vers la mise en phase de l'ensemble des voies amplificatrices. Cette solution de combinaison ne présente pas les limitations rencontrées avec la combinaison spectrale car le nombre de voies amplificatrices peut être très élevé et par voie de conséquence la puissance totale. En revanche le caractère actif et l'algorithme à mettre en œuvre la rendent plus complexe que la combinaison spectrale qui est quant à elle passive, en particulier lorsqu'on recherche à réaliser la combinaison cohérente au niveau de la cible. Il est par ailleurs possible d'associer les 2 techniques dans un même système laser.

SYSTÈMES D'ARME LASER ET PROBLÉMATIQUES PRINCIPALES:

Un système d'arme laser se compose principalement :

- D'un sous-ensemble de détection initiale de cibles qui peut être un radar ou une caméra grand champ ;
- D'un sous-ensemble d'émission laser qui incorpore notamment la ou les fibres actives, le dispositif de combinaison de faisceaux en cas de multi-faisceaux ;
- D'un sous-ensemble de transport, d'agrandissement du faisceau laser par télescope (afin de minimiser le waist du faisceau), et de focalisation du faisceau;
- D'un sous-ensemble de pointage du faisceau laser sur la cible avec une très grande précision (pour des distances supérieures au km), en prenant en compte les effets des turbulences atmosphériques ;
- D'un sous-ensemble de gestion thermique pour tous les éléments

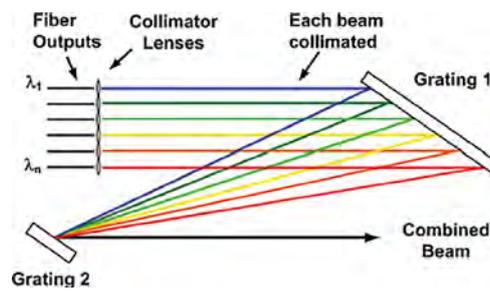


Figure 2. Principe de la combinaison spectrale

nécessitant une dissipation de la chaleur (en particulier le sous-ensemble laser) ;

- D'un sous-ensemble d'alimentation électrique et de génération électrique autonome ;
- D'un sous-ensemble de contrôle-commande.

Il s'interface notamment :

- Avec sa plate-forme d'emport qui est un véhicule terrestre, un navire, un aéronef ;
- Avec le contrôle-commande du système d'arme principal

Quelques-unes des problématiques rencontrées sont celles du SWaP (de l'anglais « Size, Weight and Power ») qui doit constamment être amélioré (système toujours plus compacts et consommant toujours moins d'énergie) et celle de la sécurité oculaire (non pas liée au faisceau direct mais aux réflexions diffuses et aux risques qu'elles peuvent représenter, en particulier pour les personnels opérant les systèmes ou à proximité) ouvrant l'alternative de l'emploi d'émetteurs à d'autres longueurs d'onde, en particulier à 2 microns, plus sûrs de ce point de vue mais présentant des inconvénients d'efficacité et de coût (à effets constants sur une cible)

LES SYSTÈMES D'ARMES LASER DE DERNIÈRE GÉNÉRATION EN FRANCE ET DANS LE MONDE

C'est aux Etats-Unis qu'ont eu lieu les développements les plus nombreux et les plus précoces des armes laser « modernes », c'est-à-dire celles

basées sur des lasers à solide, d'abord des cristaux pompés par diodes de la fin des années 1990 à la fin des années 2000, puis des lasers à fibres pompés par diodes à partir du milieu des années 2000. Il y a de nombreux projets en cours avec notamment des lasers de puissance 300 kW évoluant d'ici quelques années vers le MegaWatt impliquant des sociétés comme Lockheed Martin, Boeing/General Atomics, nLight dans le cadre du programme HELSI (High Energy Laser Scaling Initiative) du DoD.

Des projets ont été menés ou sont en cours dans plusieurs autres pays. Au Royaume-Uni, le projet DragonFire piloté par MBDA a conduit à la réalisation et au test récent d'un démonstrateur. Le projet Tracey piloté par Thales et BAE Systems est actuellement en cours de développement. En Allemagne les sociétés MBDA et Rheinmetall ont réalisé chacune des démonstrateurs

En France, la société CILAS a développé le démonstrateur HELMA-P testé avec succès pour l'application de la lutte anti-drones notamment au centre d'essais de la DGA à Biscarosse.

Les systèmes HELMA-P seront utilisés dans le cadre du programme L2AD (Laser de Lutte Anti-Drones) lancé en 2022 par la DGA, et dans ce cadre assureront par exemple la protection de sites lors des Jeux Olympiques de Paris en 2024.

La nouvelle Loi de Programmation Militaire 2024-2030 confirme la poursuite des efforts de développement d'armes laser, notamment pour des applications de défense spatiale, avec des moyens en orbite (projet FLAMHE) ou au sol (projet BLOOMLASE).

Enfin des initiatives ont vu également le jour au niveau Européen, notamment en termes de R&T comme le projet TALOS piloté par la société CILAS de 2019 à 2023, et de nouveaux financements de ces technologies sont prévus par le Fonds Européen de Défense (FED). ●

Laser Fibré Femtoseconde



La série FemtoFiber ultra de TOPTICA est une nouvelle génération de lasers fibrés femtosecondes spécifiquement développés pour la microscopie multi-photonique, la lithographie à 2 photons et la métrologie de semi-conducteurs.

www.toptica.com/ultra

CAPTEUR POUR LASER DE PUISSANCE

Ce capteur permet de mesurer rapidement la puissance laser jusqu'à 10 kW en continu/12 kW en intermittent sur des faisceaux allant jusqu'à 65



mm de diamètre en moins de 3 secondes. Compatible avec les lasers allant de l'UV à l'IR, il offre également des fonctionnalités pratiques pour le montage et l'alignement.

www.coherent.com/laser-power-energy-measurement/power-sensors/pm10k-plus

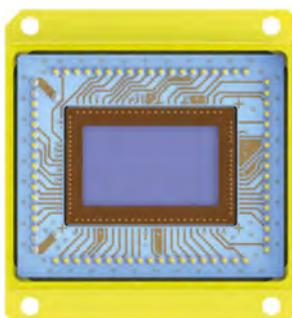
Laser ultracourt en mode rafale



Le laser ultracourt LXR® de Luxinar présente des innovations dans la génération de mode en rafale « burst mode ». Le traitement en mode rafale consiste à délivrer des séquences (rafales) de plusieurs impulsions laser ultra-courtes avec des délais inter-impulsions précisément contrôlés pour un traitement optimal des matériaux. Le laser peut émettre jusqu'à 170 impulsions séparées de 25 nanosecondes..

www.luxinar.com/fr/products/lxr-series/

CAPTEUR SWIR



NSC2101 de New Imaging Technologies est un capteur SWIR InGaAs haute performance avec un pas de pixel de 8µm. Son faible bruit garantit une excellente qualité d'image même dans des environnements

difficiles. Sa plage dynamique de 64dB lui permet de capturer un large spectre d'intensités lumineuses avec précision.

<https://new-imaging-technologies.com/news/new-high-resolution-swir-sensor-with-high-performance/>

Caméra qCMOS

L'ORCA-Quest 2 est une nouvelle caméra qCMOS, qui succède à l'ORCA-Quest, avec des avancées telles que des vitesses de lecture plus rapides en mode de balayage à très faible bruit et une sensibilité accrue dans l'UV. La caméra permet d'accéder à l'imagerie quantitative en résolvant le nombre de photons détectés.



www.hamamatsu.com/jp/en/product/cameras/qcmos-cameras/C15550-22UP.html

Quantum ready

par **OPTON LASER**
INTERNATIONAL



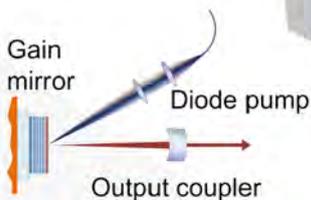
Cavités externes & Amplificateurs

- ▲ 350 à 2150nm jusqu'à 25 W
- ▲ Grande robustesse, ultra stable



Lambdamètres & Contrôleurs

- ▲ Lambdamètres Ethernet, USB ou autonome
- ▲ Contrôleurs laser tout-en-un
- ▲ PID-PI²D faible latence
- ▲ Synthétiseurs de fréquence RF 400MHz



Lasers VECSEL

- ▲ SF de 700-2150nm
- ▲ SHG de 350-750nm
- ▲ Finesse spectrale <10kHz (100µs)
- ▲ Puissance jusqu'à 12W



Peigne de fréquences FFC-100

- ▲ Stabilité en fréquence <10⁻²² à 10⁴s
- ▲ Transfert de pureté spectrale
- ▲ Horloge optique

Nombreux accessoires & options disponibles. Visitez notre [site web](http://www.optonlaser.com) !



Votre contact : Baptiste.Callendret@optonlaser.com

