

Photoniques

LA LUMIÈRE ET SES APPLICATIONS

ENTRETIENS

Jean-Luc Gach
Claude Boccara

FOCUS

Micro-affichage pour
les lunettes connectées

OSEZ L'OPTIQUE

Le kit pédagogique
LightBox

EXPÉRIENCE

Impulsions laser
intenses dans l'air

DOSSIER

ŒIL & VISION

- Imagerie 3D en direct : la tomographie par cohérence optique dynamique
- Tomographie par cohérence optique plein champ pour l'imagerie in vivo de l'œil humain
- Mesure de la transparence cornéenne par l'analyse d'images OCT
- L'optique adaptative en ophtalmologie : d'une imagerie de la rétine à un outil de pilotage de la santé



- Le système optique de l'œil



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 Bonaulet (CNRS),
Benoît Cluzel (Université de Bourgogne),
Sara Ducci (Université de Paris),
Céline Fiorini-Debusschert (CEA),
Sylvain Gigan (Sorbonne Université),
Aurélien Jullien (CNRS),
Patrice Le Boudec (IDIL Fibres Optiques),
Christophe Simon-Boisson (Thales LAS France).

Advertising Manager

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 : août 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

Visionnaires

Comment imaginer l'œil ? Comment voir ce qui nous permet de voir ? Il fallait des scientifiques visionnaires pour développer des techniques instrumentales comme la tomographie par cohérence optique ou encore pour proposer dès les années 1970 d'utiliser les impulsions lasers pour soigner et opérer l'œil. Patricia Bath confiera à la suite de ses travaux pionniers menés dans les années 1980 sur l'opération par laser de la cataracte « When I talked to people about it, they said it couldn't be done ». Cette vision et cette démarche novatrice ont permis d'imager l'œil et de rendre la vue à des millions de personnes.

Les technologies optiques et photoniques ont un lien fort avec la vision, que ce soit pour imaginer l'œil et diagnostiquer ses pathologies, opérer et soigner, corriger la vue ou encore développer des systèmes de vision en réalité virtuelle ou en réalité augmentée. Les progrès en tomographie par cohérence optique et en optique adaptative continuent d'ouvrir notre regard sur l'œil, et ce numéro met à l'honneur les dernières avancées dans ces domaines. En parallèle aux 4 articles de ce dossier, je vous invite à découvrir le focus de ce numéro dédié aux nouvelles technologies de micro-affichage pour les lunettes connectées, et l'article « Comprendre le système optique de l'œil ».

Il fallait également être visionnaire pour lancer le projet Teramobile afin d'étudier la propagation de faisceaux lasers intenses dans l'air. Aujourd'hui, comme vous allez le découvrir dans l'article *Expérience Marquante*,

l'ionisation de l'air engendrée par la propagation de ces faisceaux intenses ouvre de nombreuses voies d'innovation, allant du transfert de puissance électrique dans l'air aux communications optiques en espace libre et au guidage de la foudre. Sur ce dernier sujet, la première démonstration de guidage laser de la foudre réalisée durant l'été 2021 au mont Saentis en Suisse déclencha un véritable coup de tonnerre dans la communauté scientifique et connut un fort écho dans la presse généraliste. La lumière a de tout temps suscité l'intérêt des plus grands scientifiques et les expériences d'optique continuent d'émerveiller un large public. C'est bien là la force de notre discipline: pouvoir avec une instrumentation simple et frugale tout à la fois émerveiller les regards et stimuler l'intellect sur les propriétés fondamentales de la lumière. Les expériences d'optique doivent ainsi trouver une place centrale dans l'enseignement et la diffusion de la culture scientifique. Coup de projecteur dans ce numéro sur le projet Lightbox, ce kit pédagogique qui peut être utilisé en enseignement à des niveaux très variés ou dans des actions de médiation scientifique. Découvrez cette action unique, rapprochez-vous des référents scientifiques associés car l'une de nos missions est de susciter l'intérêt pour l'optique de la jeune génération et du grand public. Car se trouveront à coup sûr dans vos auditoires des personnalités qui sauront apprendre, s'épanouir et par une démarche visionnaire s'engageront pour répondre aux nombreux défis du vingt et unième siècle.



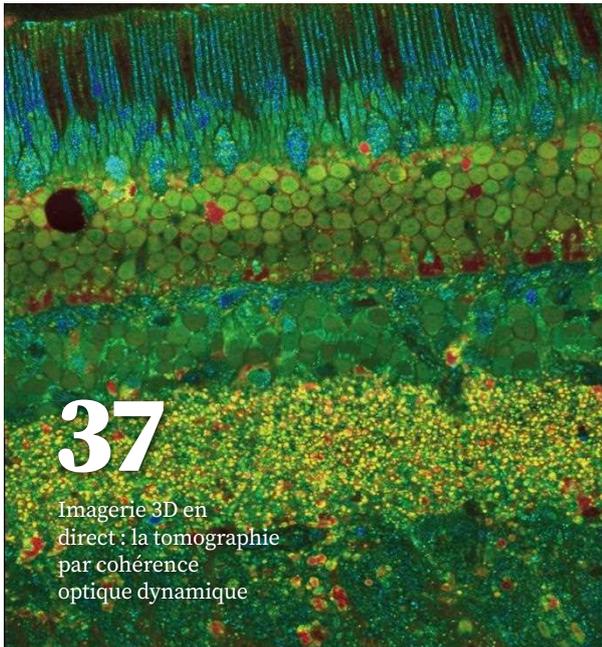
Sommaire

www.photoniques.com

N° 127

23 FOCUS

Nouvelles technologies de micro-affichage pour les lunettes connectées

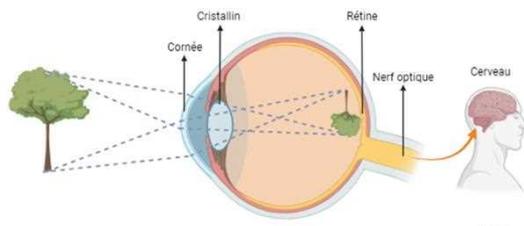


37

Imagerie 3D en direct : la tomographie par cohérence optique dynamique

57

Comprendre le système optique de l'œil



ACTUALITÉS

- 03 Éditorial et actualité de la SFO
- 05 Informations partenaires
- 12 Actualités scientifiques
- 17 Mots-croisés : œil & vision
- 18 Témoignage d'entrepreneur : Jean-Luc Gach
- 20 Entretien : Claude Boccara

FOCUS

- 23 Nouvelles technologies de micro-affichage pour les lunettes connectées

OSEZ L'OPTIQUE

- 27 Le kit pédagogique LightBox

EXPÉRIENCE MARQUANTE

- 32 Propagation d'impulsions laser intenses dans l'air

DOSSIER : ŒIL & VISION

- 37 Imagerie 3D en direct : la tomographie par cohérence optique dynamique
- 41 Tomographie par cohérence optique plein champ pour l'imagerie in vivo de l'œil humain
- 46 Mesure de la transparence cornéenne par l'analyse d'images OCT
- 52 L'optique adaptative en ophtalmologie : d'une imagerie de la rétine à un outil de pilotage de la santé

COMPRENDRE

- 57 Le système optique de l'œil

PRODUITS

- 61 Nouveautés

Annonceurs

Ardop 51
 Ecoc 19
 Edmund Optics 33

Edp sciences 13, 35, 53
 Epic II^e de couv., 11
 Imagine Optics 47
 Opton Laser IV^e de couv.

Prolite 39
 Spectrogon 55
 Trioptics 45
 Wavetel 29

Yokogawa 31

Crédit photo (couverture) : ©iStockPhoto

L'édito de la SFO



FRANÇOIS SALIN
Président de la SFO



ARIEL LEVENSON
Président sortant de la SFO

Ami entends-tu... ?

Nous anticipions dans l'édito précédent le succès du congrès OPTIQUE Normandie 2024, fleuron d'échanges scientifiques, de partages amicaux et de diversité. OPTIQUE Normandie a tenu toutes ses promesses. 650 participants, issus des communautés académique, industrielle, d'enseignement et institutionnelle, se sont réunis, venant de toutes les régions de l'hexagone, de différents pays francophones et de bien d'autres horizons. OPTIQUE Normandie a été un creuset fructueux où les amoureux de l'optique ont construit ensemble, à nouveau, l'évènement francophone majeur de l'optique et la photonique.

Cette diversité nous fait plaisir. Plaisir, mais pas seulement. Comme nous l'avons rappelé dans l'édito Photoniques 124, la diversité constitue l'une des expressions du lien profond qui unit notre société savante aux principes humanistes et à l'universalisme. Elle témoigne de la vitalité de notre communauté et de la grande attractivité de nos thématiques. Mais ce n'est pas tout. Imaginons un instant nos laboratoires et nos entreprises sans cette diversité, sans la richesse culturelle, scientifique et humaine qu'elle apporte. Imaginons un instant nos universités sans les étudiants venus des quatre coins du monde, étudiants qui resteront pour enrichir nos laboratoires, nos universités et nos entreprises, ou repartiront en véritables ambassadeurs de notre culture. Imaginons enfin ce que seraient notre efficacité et notre notoriété scientifiques si nous étions contraints par l'isolement à restreindre les collaborations internationales, présentes aujourd'hui dans 65% de nos publications.

La recherche scientifique est mondiale. Diversité, métissage culturel, science ouverte

et partage sont dans notre ADN de société savante, comme l'est l'éthique de non-discrimination. Pour que les Lumières ne s'éteignent jamais, nous devons les chérir et les protéger de toute attaque obscurantiste ou si par malheur la « libération de la parole » sectaire et de repli sur soi leur portaient atteinte.

Un sincère et chaleureux chapeau bas à Florence Haddouche notre secrétaire générale, à Ammar Hideur et Patrice Camy nos chairs, à Christophe Letailleur notre orchestrateur local et aux autres collègues normands, d'origine, d'adoption ou de passage et même aux binationaux normands-bretons, dont l'accueil a été inoubliable...

***J'aimerais revoir OPTIQUE Normandie**
J'ai vu des confs en Helvétie
Et ses chalets et ses glaciers,
J'ai vu des workshops en Italie,
Et Venise et ses gondoliers.
En saluant chaque patrie,
Je me disais : « Quel chaleureux moment de
science et diversité
notre OPTIQUE Normandie,
C'est le congrès de notre communauté. »*

Ohé opticiennes et opticiens, ... rendez-vous à OPTIQUE Bourgogne / Franche-Comté du 6 au 10 juillet 2026 !

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

AGENDA



■ Réservation des stands
Dès octobre 2024



■ Thin Film Lithium Niobate
The Houches Physics School,
France - 12 au 23 Mai 2025



■ Inscription au colloque
Réservation des stands



Le Prix Jean Jerphagnon 2024

Le Prix Jean Jerphagnon 2024 récompense Julien LAURAT, co-fondateur de la startup Welinq, pour sa contribution exceptionnelle au développement des mémoires quantiques.

Lors du congrès de la Société Française d'Optique (SFO) à Rouen, en présence de la famille Jerphagnon, devant plus de 600 congressistes, la session du prestigieux Prix Jean Jerphagnon a débuté par la grande plénière de Pascale SENELLART (C2N, CNRS, co-fondatrice de Quandela) sur LES BOITES QUANTIQUES SEMICONDUCTRICES. Ensuite, M. Thierry Georges, CTO d'OXXIUS, a remis le trophée au nom du Jury présidé par Alain Aspect, lauréat du prix Nobel de physique 2022. Julien LAURAT a été chaleureusement félicité pour sa contribution exceptionnelle à l'avancement de l'information quantique, en particulier pour le développement de mémoires quantiques aux propriétés remarquables, qui a conduit à la création de la startup Welinq (welinq.eu). Julien LAURAT, est ingénieur diplômé de l'Institut d'Optique Graduate School, professeur de physique à l'université Sorbonne et membre de l'Institut Universitaire de France. En tant que chef de l'équipe Réseaux Quantiques au Laboratoire Kastler Brossel, Julien LAURAT se distingue par ses travaux novateurs sur la création de nouvelles interfaces entre lumière et atomes froids, la génération d'états non-classiques de la lumière et la mise en œuvre de protocoles d'information quantique utilisant ces ressources. Ses recherches, saluées internationalement, lui ont valu deux bourses de l'European Research Council (ERC), une Starting Grant en 2012 et une Advanced Grant en 2023.

En 2022, Julien LAURAT a cofondé la start-up Welinq, visant à devenir un acteur majeur dans l'interconnexion des processeurs quantiques et à accélérer ainsi le passage à l'échelle du calcul quantique. Welinq, qui compte aujourd'hui 20 collaborateurs, prévoit de livrer dès fin 2024 une première mémoire quantique transportable et robuste. Le prestigieux Prix Jean Jerphagnon a également honoré trois nominés, témoignant de la grande diversité de la recherche de pointe française avec des applications très prometteuses : Alexandre AUBRY (Institut Langevin, ESPCI, CNRS) pour ses contributions dans l'Imagerie de Matrices Optiques, Rémy BOULESTEIX (IRCER, Univ. Limoges, CNRS) pour ses percées dans les Nouveaux Composants Optiques pour Lasers à Base de Céramiques et Hilton BARBOSA DE AGUIAR (LKB, CNRS) pour la Microspectroscopie Raman Compressive.



Le prestigieux prix Fabry - de Gramont récompense Patrick BOUCHON (ONERA) et Hai Son NGUYEN (École centrale de Lyon) : voir page 12, l'article sur les lauréats.

[Hub Optics & Photonics]

Florent Deux, représentant du Hub Optics & Photonics, à EPIC Summit !



Lors de l'évènement « EPIC General Meeting » qui a eu lieu le 16 avril 2024, Florent Deux a représenté le Hub Optics & Photonics de Systematic en mettant en lumière le panorama de la photonique en Ile-de-France.

Le but était de maximiser la visibilité de l'écosystème photonique francilien au niveau international et mondial et de faire

porter notre voix sur des sujets clés : exports, emplois etc...

19 clusters étaient réunis à l'échelle mondiale et réalisaient, tour à tour, leur présentation. Merci Florent Deux, CEO de Polytec France, pour avoir représenté et porté la voix du Hub à cette occasion !

[ESIEE]

Ligne pilote au sein de la salle blanche de l'ESIEE



Avec le soutien de la Région Ile-de-France et de l'État, dans le cadre du projet Pro-6Po d'un montant total de 2,3 M€ (programme SESAME Filières France 2030), la plateforme salle blanche ESIEE Paris a ouvert une double ligne pilote 4 et 6 pouces.

La plateforme salle blanche de ESIEE Paris propose ses moyens de micro-fabrication aux entreprises de toutes tailles pour la réalisation de leurs prototypes et de petites séries. Pour plus d'informations, vous pouvez contacter : contact.smm@esiee.fr.

[PhotonHub]

PhotonHub Investment Readiness Coaching & Investor



Vous souhaitez lever des fonds en 2024 ? Vous êtes une start-up deep-tech traitant de technologies innovantes et/ou de photonique ?

Nous vous invitons à participer au programme de coaching de préparation à l'investissement et de mise en relation avec des investisseurs. Le programme de PhotonHub, vous aidera à découvrir ce que les investisseurs recherchent et comment leur présenter votre solution. Grâce à ce programme, vous aurez l'occasion d'apprendre à présenter vos finances et votre modèle d'entreprise et de vous entraîner à présenter votre projet en vue d'un investissement au sein de votre structure !

Si vous êtes intéressés, n'hésitez pas à postuler avant le 27 septembre 2024 :

<https://photonhub-ir1.fundingbox.com/>

En bref

Interview de Jean-François Vinchant dans le journal EPIC :

On peut devenir PDG en étant embauché par une entreprise, par promotion interne, ou tout simplement en achetant une entreprise et en poursuivant ses objectifs personnels. C'est exactement ce qu'a fait Jean-François. Après avoir acquis 12 ans d'expérience dans des fonctions de direction et obtenu un MBA, il a décidé d'acheter SEDI-ATI en 2016, il en est le PDG depuis. Une interview réalisée par EPIC !

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



En bref

Prix C'Nano - CNRS

Félicitations à Elise Bailly, ancienne doctorante du Laboratoire Charles Fabry, lauréate du prix de thèse C'Nano dans la catégorie « recherche fondamentale » pour ses travaux sur les métasurfaces photoluminescentes.

Le Forum de la photonique au 503

Le Forum de la Photonique aura lieu cette année au bâtiment 503, centre d'entrepreneuriat et d'innovation de l'Institut d'Optique à Orsay. Ce bâtiment vient d'être entièrement rénové et offre des espaces dédiés à recevoir ce type d'événements. Rendez-vous le 14 novembre prochain !

AGENDA ÉVÉNEMENTS

■ 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
de la promotion 2024
13 décembre 2024 à
l'ENS Paris-Saclay

CONTACT

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

Cérémonie de remise des insignes de Chevalier dans l'ordre national du Mérite à Rémi Carminati

Mardi 2 juillet 2024, dans la magnifique bibliothèque de Chimie ParisTech, **Rémi Carminati**, Directeur Général de l'Institut d'Optique et professeur à l'ESPCI Paris-PSL, a reçu des mains de **Sylvie Retailleau, Ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche**, les insignes de Chevalier dans l'ordre national du Mérite.

Plus d'une centaine de personnes, familles, amis et collègues, étaient rassemblés pour assister à cette cérémonie placée sous le signe de l'émotion, de la convivialité et de la fierté.

C'est d'abord Sylvie Retailleau qui s'est exprimée. Elle a débuté son discours en citant la devise inscrite sur le bâtiment 503 de l'Institut d'Optique, « A lumine motus » - animé par la

lumière. Une devise qui, selon elle, s'applique également à Rémi Carminati, qui a très jeune, puis tout au long de sa carrière, été mu par une fascination pour la lumière. Elle a retracé son parcours, depuis l'enfance jusqu'à ses fonctions actuelles, soulignant sa remarquable carrière de recherche, son goût pour le travail en équipe et rappelant l'enseignant passionné qu'il est.

Sylvie Retailleau a ensuite remis la fameuse médaille de Chevalier dans l'ordre national du Mérite à Rémi Carminati qui, ému, a pris à son tour la parole.

Il a exprimé sa gratitude pour cet honneur qui lui est fait et auquel il ne s'attendait pas. Il a insisté sur la chance qu'il a eu de rencontrer des personnalités qui l'ont inspiré ou guidé tout au long de sa carrière. Il a également rappelé son attachement profond à la science, à la recherche ainsi qu'à l'enseignement et l'importance que revêtent pour lui la transmission et les interactions avec les étudiantes et étudiants. Il a conclu son discours en remerciant les personnes qui l'entourent au quotidien, ses amis et sa famille.



Prix Yves Rocard de la SFP remis à l'équipe Damae Medical



Le Prix Yves Rocard 2024 de la Société Française de Physique a été attribué à David Siret, ancien élève de l'Institut d'Optique et co-fondateur de Damae Medical, et à Arnaud Dubois, enseignant-chercheur au Laboratoire Charles Fabry, pour l'aventure Damae Medical.

Ce prix récompense un transfert de technologie réussi entre un laboratoire académique et une entreprise.

Damae Medical est une startup française fondée à Paris en 2014 par Arnaud Dubois et deux ingénieurs, Anaïs Barut et David Siret, rencontrés par la Filière Innovation Entrepreneurs de l'Institut d'Optique Graduate School !

La mission de Damae Medical est d'améliorer le diagnostic du cancer de la peau grâce au développement d'un nouveau dispositif d'imagerie portable qui permet une visualisation 3D non invasive des tissus cutanés.

French Photonics Days à Besançon

Les inscriptions sont ouvertes

Les French Photonics Days se dérouleront 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 sixième édition des French Photonics Days. Retrouvez-nous les 15-16 octobre à l'Espace Gramont en centre-ville. L'évènement est organisé avec le soutien de l'Uni-

versité de Franche-Comté, de la Région Bourgogne-Franche-Comté, de Grand Besançon Métropole et TEMIS Technopole.

Le thème principal de cette année : « Micro-nanotechnologies photoniques de rupture ». Conçues pour un public technique, mais non spécialiste, 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...). Les conférences seront ponctuées de nombreux moments de networking et d'une soirée de gala.

Découvrez le programme complet et inscrivez-vous sans tarder sur le site de l'évènement : fpd2024.fr

Save the date

Business Meeting - La Photonique avec le CNRS

À vos agendas ! Photonics France organise un Business Meeting avec le CNRS le 22 novembre à Paris.

Ce Business Meeting sera l'occasion de découvrir le CNRS, ses activités et ses opportunités de partenariat autour d'une thématique centrale : la trajectoire de la lumière, de l'émetteur au capteur. Les conférences en préparation seront proposées notamment sur les lasers de puissance à fibre, sur la conception et fabrication d'optiques avec des matériaux et sur les technologies de capteurs pour la biologie et le quantique.

Le témoignage d'un Labcom est également au programme pour vous livrer un retour d'expérience réussi entre l'institution de recherche et un industriel.

Retenez bien la date ! Le programme détaillé et les modalités d'inscription vous seront annoncés cet automne.



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 !

AGENDA

Nos prochains rendez-vous :

■ **Webinaire - Rencontre avec les nouveaux adhérents***
10 septembre 2024

■ **Webinaire - Business France et ses services***
17 septembre 2024

■ **Business Meeting La Photonique avec Lavoix : propriété industrielle et contentieux***
25 septembre 2024
Paris (hybride)

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

■ **Contrôle et métrologie optique (avec Alpha-RLH)**
13-14 novembre - Bordeaux

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

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

* Évènement réservé à nos adhérents.

CONTACTER
PHOTONICS FRANCE

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

Ils ont rejoint le cluster

Imagine Optic : Optique adaptative.

Aerotech Ltd : Positionnement de précision (UK).

Kwan-Tek : Capteurs quantiques (ancienne équipe Wainvam-e).

Optoprim : Distributeur d'instruments, composants et lasers.

Tomometrix : Études tomographiques.

Agro Innovation International (Groupe Roullier) : Nutrition végétale et animale.

Vanguard Automation : Equipement pour PIC (DE).

Landelles Consulting : Consultant indépendant en photonique (fibres optiques sous-marine).

ZE-NI : Traitement des eaux usées industrielles de micro-algues.

EuroFin Consulting : Consultant indépendant en photonique.

2B Lighting : Instruments pour fibres / colorimétrie.

Plasseraud IP : Cabinet de propriété intellectuelle.

OBS Innovation : Organisation bretonne de sélection végétale (sélectionneur)



AGENDA

■ **SPACE**
17-19 septembre 2024,
Rennes (France)

■ **ECOC**
22-26 septembre 2024,
Francfort (Allemagne)

■ **SPIE Photonics West**
25-30 janvier 2025, San Francisco
(Etats-Unis)

CONTACT

communication@photonics-bretagne.com
www.photonics-bretagne.com

Assemblée Générale de Photonics Bretagne



Photonics Bretagne a rassemblé 70 participants le 5 juillet à Lannion lors de son Assemblée Générale. Adhérents, partenaires, financeurs, et salariés ont ainsi pu assister au bilan des activités de l'association sur 2023, mais aussi avoir un aperçu des

activités débutées en 2024 et des perspectives à plus long terme. 13 nouveaux adhérents ont ainsi officiellement intégré le cluster de 125 adhérents désormais. Voici d'ailleurs l'une des informations qui était à retenir afin de bien répondre au quiz qui ponctuait de manière ludique la première partie de matinée. Cette animation a parfaitement fait le lien avec la suite du programme qui mettait en lumière la collaboration menée avec le CMQe Numérique, Photonique & Cybersécurité dans le cadre de la mise en place de stages en photoniques pour les collégiens de 3^{ème}. Ceux-ci ont été invités à venir présenter en quelques minutes leur projet « Ma 1^{ère} start-up photonique » créé au cours de leur stage, face à un auditoire impressionné par ces jeunes talents ! Pour terminer la matinée, la traditionnelle session de pitches adhérents a donné la parole à Evosens, ArmorScience, Tomometrix, Images & Réseaux, Kwan-Tek, et Percipio Robotics. Puis précédé par un cocktail favorisant le réseautage, l'après-midi était consacrée à 4 ateliers de brainstorming portant sur des thématiques qui sont chères à l'écosystème photonique : formation/emploi, technologique, animation de filière, et propriété intellectuelle. Une journée bien rythmée et réussie qui marque un moment fort de l'année où la communauté photonique bretonne (et non bretonne) se retrouve pour réseauter et phosphorer !

Un meeting EPIC sur les fibres optiques spéciales sur la côte de granit rose

Co-organisé avec EPIC, Photonics Bretagne a accueilli à Perros-Guirec les 12 et 13 juin leur meeting sur les fibres optiques spéciales : nouveaux designs et nouvelles applications. Une cinquantaine de participants venus de toute l'Europe, a assisté à 20 conférences d'experts autour de 4 thématiques : Fibres pour lasers, Fibres pour la détection, Préparation et caractérisation des fibres, Fibre pour la transmission de la lumière. Au programme également : des visites d'entreprises photoniques à Lannion telles que Exail, Lumibird, Kerdry, Oxxius, Idil Fibres Optiques, et Photonics Bretagne.

La côte de granit rose a su séduire l'ensemble des convives par la qualité de l'expertise photonique locale mais également par son cadre exceptionnel face à la mer, le tout sublimé par un temps ensoleillé !



Retour sur le Forum des adhérents 2024

Le Forum des adhérents 2024 du pôle s'est déroulé le 6 juin dans le superbe cadre du Château de Seguin Events, près de Bordeaux. 200 participants - adhérents et partenaires - étaient présents à cet événement annuel incontournable, pour partager moments clés, échanges et convivialité.



L'Assemblée Générale a dressé le bilan des actions 2023 et les perspectives 2024. Nous souhaitons la bienvenue à Yvan Martin, qui succède à Sébastien Barré en tant que Directeur du CEA Cesta et a été élu nouveau Président du pôle à l'occasion de ce rendez-vous.

Après une conférence proposée par l'AFPC sur le label « Pôle de compétitivité », le cabinet Roland Berger a présenté un état des lieux des technologies, innovations et marchés en photonique et en électronique.

L'après-midi était consacré à des ateliers sur les marchés applicatifs du pôle, avec des interventions d'adhérents, sur les thématiques suivantes :

- Enjeux de l'éco-conception technologique en santé
- Etat de l'art des directives en matière de cybersécurité NIS 2
- Programme SAPHyR
- Autoconsommation dans les bâtiments

Des stands ont permis à 15 industriels de présenter leur expertise et leurs technologies. Nous tenons à remercier SERMA Group, sponsor officiel de la journée.

LEARNING EXPEDITION EN SUISSE : DÉCOUVERTES ET INNOVATION



Du 10 au 13 juin 2024, le pôle ALPHA-RLH et 8 de ses adhérents ont eu le privilège de participer à une Learning Expedition en Suisse, à Neuchâtel et Genève. Cette mission a permis aux participants de s'immerger dans l'univers de l'innovation et des technologies de pointe dans des domaines tels que la photonique, les microtechniques et les medtechs.

Amplitude Laser, AUREA Technology, CERAP, NAPA Technologies, OptoSigma, Percipio

Robotics, PISÉO et SERMA Microelectronics ont pu visiter des entreprises et des instituts de recherche renommés, comme le CSEM.

Cette expédition a favorisé les opportunités de réseautage qui pourront donner lieu à des partenariats d'affaires ou à de futurs projets collaboratifs avec les structures visitées, mais également entre les membres de la délégation.

VLM Robotics lauréat France 2030 avec le projet MT-Robotics



Adhérent du pôle ALPHA-RLH, VLM Robotics est fabricant de cellules agiles robotisées de manufacturing 4.0. Basée en Gironde, la société est lauréate du programme France 2030 « Offre de robots et Machines intelligentes d'excellence » avec le projet MT-Robotics.

Ce projet propose une robotique de manufacturing 100% française à vocation européenne pour faire émerger un schéma industriel nouveau de « fabrication à la demande » de pièces métalliques de grandes dimensions.

Il repose notamment sur une architecture de pilotage différente, une continuité numérique intégrale et l'hybridation des procédés pour finir la pièce XXL *in situ*.

Autour de VLM Robotics, le consortium se compose de Naval Group, spécificateur et qualificateur du besoin, de l'école d'ingénieurs Centrale Nantes, expert du procédé fabrication additive, de JANUS Engineering, expert programmation et du Cetim, expert usinage.

Le pôle ALPHA-RLH a accompagné le projet MT-Robotics depuis son émergence et tout au long du processus de qualification : de la lettre de soutien à la labellisation du projet, jusqu'au coaching pour la préparation de la soutenance.

AGENDA

■ BIPSA 2024
16 octobre à Poitiers

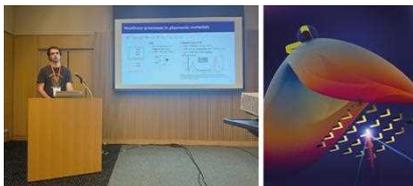
■ 9^{ème} édition d'INPHO
Venture Summit
24 et 25 octobre à Bordeaux

■ Contrôle et Métrologie optique
13 et 14 novembre à Mérignac

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

Zoom sur le travail de recherche d'un doctorant de NANO-PHOT

Dans la cadre d'une cotutelle entre le L2n de l'UTT et le Politecnico di Milano, Augustin VERNEUIL travaille sur l'utilisation de la génération de seconde harmonique par un réseau de nano-antennes d'or optimisé afin de superposer des ordres de diffraction aux pics d'émission des antennes, augmentant ainsi le rapport signal/bruit obtenu. Ce recouvrement permet de suivre le changement directionnel de l'émission entraîné par une variation d'indice de réfraction, ce qui offre un nouveau moyen de mesurer ce dernier, en plus de la variation de résonance plasmonique. Cet effet pourrait être utilisé pour la détection moléculaire, afin d'atteindre des performances meilleures que celle des capteurs plasmoniques linéaires. Augustin souhaite utiliser ce système pour un dépistage précoce de maladies telles que le diabète de type 1.



Augustin Verneuil pendant sa présentation à la conférence META-2024 et page de la couverture du Journal Nanophotonics illustrant ses travaux (<https://doi.org/10.1515/nanoph-2023-0842>)

AGENDA

- **Rentrée master**
12 septembre

- **Rentrée de l'école doctorale**
30 Septembre

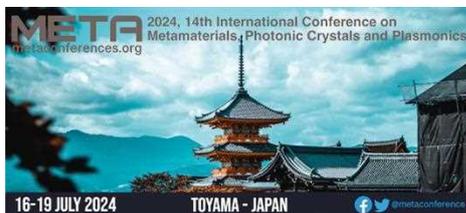
- **Conférence NFO-17**
2-6 décembre, Melbourne, Australie

- **1^{ère} participation de NANO-PHOT au forum des entreprises de UTT**
1^{er} octobre 2024, Troyes

CONTACT

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

Participation à la conférence META-2024



La graduate school NANO-PHOT (nano-phot.utt.fr) et le laboratoire L2n (l2n.utt.fr) se sont illustrés lors de la conférence META-2024 qui s'est tenue à Toyama, au Japon, du 16 au 19 juillet.

Cinq présentations sur invitation :

- Augustin Verneuil : « Nonlinear optical sensing in arrays of plasmonic nanoparticles » (voir plus bas)
- Liudmina Trotsiuk : « Polymerization of diazonium salts on gold nanoparticles: hot electron and heating effects ».
- Davy Gérard : « Far-field and near-field chirality in plasmonic metamolecules ».
- Jérôme Plain : « From synthesis to assembly: a silicon-based metasurface fabrication ».
- Renaud Bachelot, directeur de NANO-PHOT, représentant également le laboratoire CINTRA (<https://lnkd.in/e5v3YE7G>) : « Recent challenges in hybrid plasmonic nano-emitters ».

Récente publication dans la revue ACS Nano

Vers des composants optoélectroniques ultra-simples réalisés et utilisant une quantité de matière infinitésimale.

Les matériaux 2D aussi fins que l'épaisseur de quelques atomes présentent des propriétés remarquables liées aux effets de confinement électronique dans la direction perpendiculaire à la surface. Des dispositifs réalisés à partir de ces matériaux peuvent dépasser toutes les

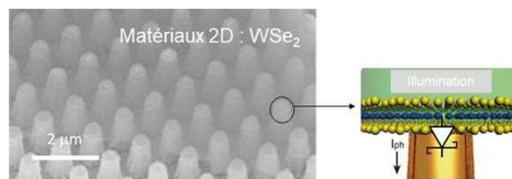
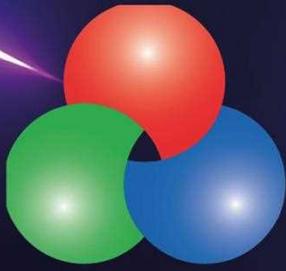


Image MEB montrant l'électrode structurée recouverte par le matériau 2D et schéma de principe illustrant le concept de « pin diode »

technologies actuelles. L'UTT en collaboration avec l'Université Sankyunkyan et l'Université polytechnique du Togo a démontré un nouveau type de structure active constituée d'une électrode nano ou meso-structurée recouverte de feuilles de matériau 2D WSe₂ (ACS Nano 18, 5, 2024). Le dispositif réalisé montre une sensibilité record pour un dispositif passif ne nécessitant aucune tension externe de polarisation, ouvrant la porte à des dispositifs particulièrement efficaces en termes de quantité de matière active et de quantité d'énergie utilisée pour la fabrication de la partie active.

Actualités

- Workshop international sponsorisé par NANO-PHOT à l'UTT du 10 au 14 juillet : <https://www.optoin.org/OPTO/>
- Recrutement de 25 nouveaux excellents étudiants master en mai et juin



DAY OF PHOTONICS

21 OCTOBER 2024

Every company, school, organization, association, university, and individual is invited to participate!

Organise an activity for Day of Photonics!

www.day-of-photonics.org

DAY OF PHOTONICS disseminates “photonics” towards the general public. It is an initiative of EPIC, the industry association that promotes the sustainable development of organisations working in the field of photonics. EPIC fosters a vibrant photonics ecosystem by maintaining a strong network and acting as a catalyst and facilitator for technological and commercial advancement.



Prix Fabry de Gramont

Hai Son Nguyen, lauréat du Prix Fabry de Gramont 2024 pour ces travaux sur les développements de nouveaux états de la lumière dans les cristaux photoniques : de la physique non-Hermitien pour les photons aux dispositifs opto-électronique innovants.

Hai Son Nguyen a effectué sa thèse au Laboratoire Pierre Aigrain à l'École Normale Supérieure de Paris entre 2008 et 2011 sur l'optique quantique des sources de photons uniques sous excitation résonnante, puis un post-doctorat au Laboratoire de Photonique et de Nanostructures (Marcoussis) entre 2011 et 2014 sur la physique des quasiparticules issues du régime de couplage fort entre les excitons de semiconducteurs et les photons en cavité. Depuis son recrutement à l'École Centrale de Lyon (09/2014) en tant que maître de conférences, Hai Son Nguyen mène plusieurs recherches au sein de l'Institut des Nanotechnologies de Lyon dans différents domaines de la photonique contemporaine avec plusieurs travaux originaux ayant un grand impact sur la communauté de la photonique et de la matière condensée. En ingénierie des diagrammes de bande photonique



dans les cristaux photoniques, il a mis en évidence le contrôle à la demande de la relation de dispersion via la brisure de symétrie, et la formation de bandes plates dans les bicouches de moirés photoniques. En physique topologique, il a développé le concept de quantité de mouvement synthétique, permettant de réaliser des équivalents optiques du semimétal de Weyl et de l'isolant de Chern,

en observant l'hybridation des arcs de Fermi à l'interface entre deux semimétaux de Weyl. En physique non-Hermitienne, il a étudié plusieurs phénomènes de couplage lumière-matière autour des singularités photoniques comme les points exceptionnels et les états liés dans un continuum. Dans cette direction, il a mis en évidence l'augmentation de l'émission spontanée des émetteurs quantiques couplés aux points exceptionnels photoniques. En particulier, il a étudié de nouveaux types d'émissions laser et de pièges optiques, et exploré le régime de couplage fort lumière-matière en utilisant des états liés dans un continuum. Hai Son Nguyen est membre junior de l'Institut Universitaire de France (IUF) pour la promotion 2020-2025. Il est auteur de 55 articles scientifiques dans des revues à comité de lecture et il a présenté une trentaine de communications orales invitées dans des congrès internationaux. ●

Patrick Bouchon, lauréat 2023 du prix Fabry – de Gramont pour ses travaux en nanophotonique sur les interactions lumière-matière dans les nano-antennes optiques pour l'infrarouge et le térahertz, allant de leur compréhension physique aux applications optoélectroniques.

Patrick Bouchon est docteur de l'École polytechnique pour ses travaux effectués entre le LPN/CNRS et l'ONERA sur le développement de modèles électromagnétiques et l'ingénierie d'absorption par des nanostructures. Depuis 2011, ingénieur-chercheur à l'ONERA, ses activités vont de la physique fondamentale avec la conception de nouvelles nano-antennes plasmoniques aux applications en utilisant leur capacité à manipuler ou émettre de la lumière ou à exalter les interactions lumière-matière. Il a ainsi démontré la capacité de contrôler spatialement et spectralement l'émission thermique à l'échelle de la longueur d'onde en utilisant des juxtapositions d'antennes patches. En collaboration avec l'institut Langevin, il a étudié le champ proche de nano-antenne unique, et mis



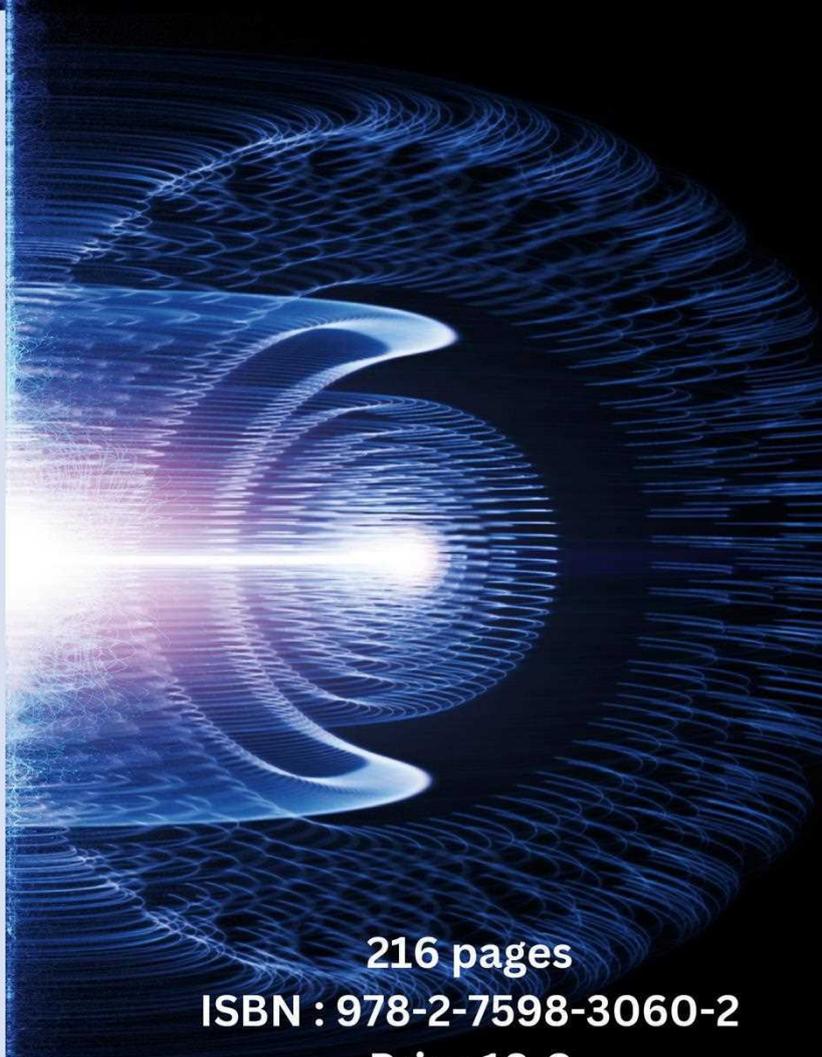
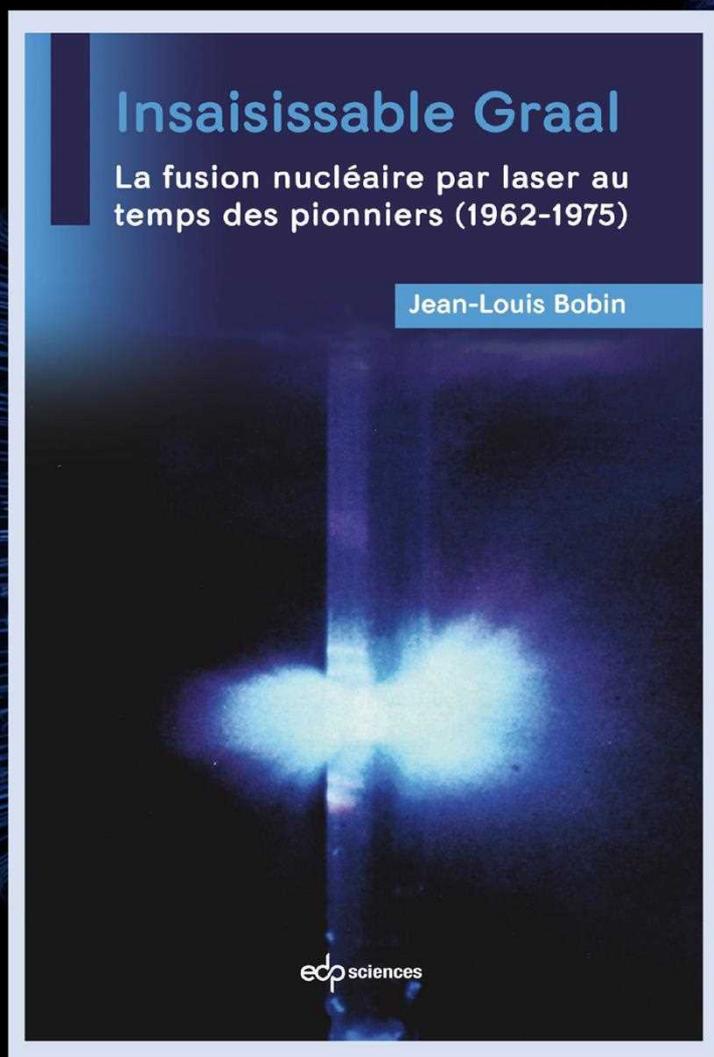
au point une technique expérimentale pour déterminer la section efficace d'émission thermique. Il a également développé une nouvelle famille de résonateur optique, appelé Helmholtz par analogie avec l'acoustique, qui a pu être appliqué à la photodétection infrarouge

en le couplant à des boîtes quantiques colloïdales (partenariat INSP, C2N), ainsi qu'à l'exaltation de la signature en absorption de molécules en partenariat (partenariat IOGS, C2N). Par ailleurs, il développe avec la PME R&D Vision, un imageur Térahertz basée sur de la conversion thermique par des antennes, pour lequel il a été finaliste du prix Jean Jerphagnon deux années consécutives. Ses travaux trouvent aussi des applications dans le domaine de la défense en lien étroit avec la DGA.

Patrick Bouchon est depuis 2021 directeur de recherche à l'ONERA, Université Paris-Saclay en charge de la thématique scientifique couvrant l'optoélectronique, la nanophotonique et la photodétection. Il a également été éditeur associé à Optics Express ces 6 dernières années. ●

La fusion nucléaire par laser au temps des pionniers

Par Jean-Louis Bobin



216 pages

ISBN : 978-2-7598-3060-2

Prix : 19 €

Disponible en version
papier et ebook sur
laboutique.edpsciences.fr

Dans cet ouvrage, l'auteur, témoin et acteur de cette aventure, nous livre un récit, fait de science et de vécu, de la première décennie d'une longue histoire, celle de la fusion nucléaire par laser.



Des métamatériaux gravés par laser à l'intérieur de la silice

Depuis leur invention, les métamatériaux permettent, grâce à des motifs élémentaires de dimension sub-longueur d'onde judicieusement arrangés, de générer des fonctions optiques nouvelles. Jusqu'à présent réalisables uniquement par nanolithographie à la surface de matériaux spécifiques, cette limitation vient d'être levée grâce à une nouvelle approche de fabrication : l'ablation laser ultrabrève. Flexible et rapide, elle ouvre de nouvelles perspectives pour la nanofabrication de la prochaine génération de composants photoniques intégrés, en volume, dans des matériaux optiques standards comme la silice.

Les structures nanophotoniques sont composées de nanotrous gravés à la surface de matériaux à haut indice de réfraction. Le diamètre et la périodicité des trous sont les degrés de liberté habituellement utilisés pour contrôler l'indice effectif et ainsi écrire une fonction optique arbitraire. Il manquait cependant jusqu'ici la capacité technologique de fabriquer de telles structures en volume et en 3D, ainsi que d'ouvrir le champ des matériaux optiques adéquats, actuellement très limité. Des chercheurs du laboratoire Lasers Plasmas et Procédés Photoniques (LP3, CNRS/Aix-Marseille Université) ont introduit un nouveau concept de fabrication de métamatériaux par laser. Ils viennent de démontrer qu'en remplaçant les agencements usuels de nanotrous peu profonds par des nanocanaux de plusieurs dizaines de microns de longueur, n'importe quel matériau optique, même la simple silice, devient alors un matériau hôte adapté. Son faible indice de réfraction, habituellement rédhibitoire pour fournir le contraste d'indice élevé nécessaire au fonctionnement efficace

de ces structures, est alors compensé par la longueur des canaux sur laquelle un faisceau de lecture verra son front d'onde modulé. La pertinence du concept a été démontrée en réalisant un prototype de métaprisme (voir Figure a) d'ores-et-déjà fonctionnel pour une utilisation dans le proche infrarouge.

La clé permettant de réaliser ces structures est de changer radicalement de technologie de fabrication. En utilisant une impulsion ultrabrève avec une mise en forme adéquate du faisceau (faisceau de Bessel), chaque tir laser génère alors une micro-explosion à géométrie contrôlée à l'intérieur du bloc de verre, permettant de réaliser une cavité de dimensions ajustables selon les paramètres laser. Ceci permet de réaliser aussi bien des structures complexes à gradient d'indice (comme un métaprisme ou une lentille à gradient d'indice) que des structures de type guide

d'onde photonique (voir Figure b), avec une totale liberté de design.

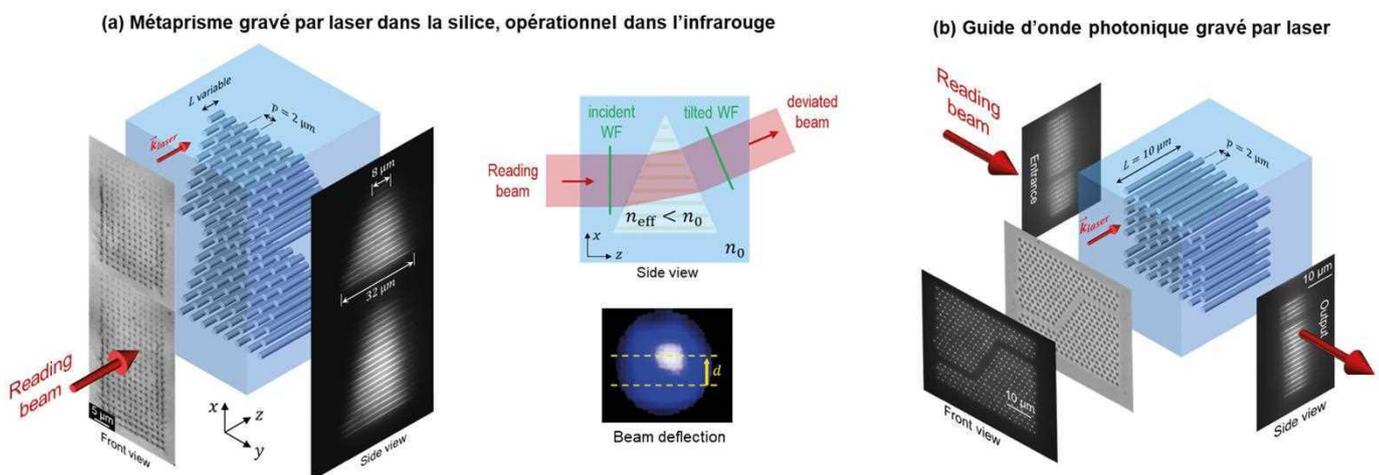
Contrairement aux nanotechnologies planaires usuelles, cette fabrication digitale par laser combine haut degré de flexibilité (une seule étape, aucun masque, contrôle individuel des dimensions de chaque canal) et propreté du procédé, qui n'utilise ni solvant chimique ni technologies sous vide. Avantages annexes, la technique est transposable à n'importe quel matériau optique, et permet d'écrire des composants totalement enterrés dans le volume du matériau – donc naturellement protégés – et offre la possibilité de cascader plusieurs fonctions optiques.

Ces résultats ouvrent la voie à la réalisation de puces photoniques 3D multifonctions intégrées dans des matériaux optiques standards. ●

RÉFÉRENCE

S. Datta, R. Clady, D. Grojo, O. Utéza, N. Sanner, "Scalable nanophotonic structures inside silica glass laser-machined by intense shaped beams," *Laser & Photonics Reviews* 2301365 (2024) <https://doi.org/10.1002/lpor.202301365>

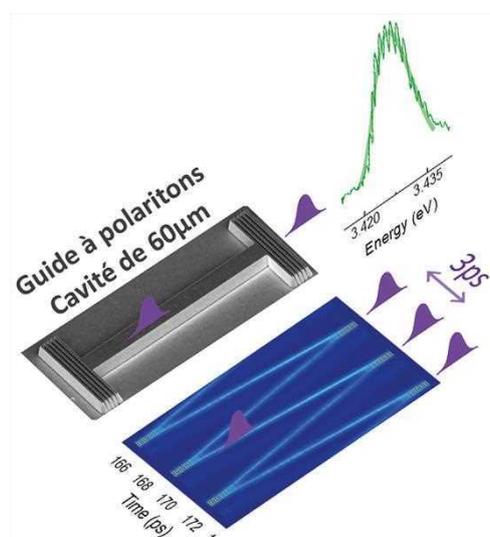
Composants photoniques gravés par laser : (a) Métaprisme composé de nanocanaux, et sa caractérisation fonctionnelle, (b) Structure de type guide d'onde cristal photonique.



Des microlasers impulsionnels à très haute répétition grâce aux lasers à polaritons

Des dispositifs toujours plus miniaturisés permettent aux lasers semiconducteurs d'augmenter la fréquence de répétition des impulsions qu'ils produisent. Encore faut-il que le milieu amplificateur fournisse un gain suffisant sur une distance micrométrique, et qu'il remplisse les conditions du "blocage de modes", ce qui déclenche le régime impulsional. Une équipe de recherche vient de démontrer la réalisation d'un laser à polaritons impulsional fonctionnant de $T=150\text{K}$ jusqu'à température ambiante, et reposant sur un mécanisme de verrouillage de mode basé sur la forte non-linéarité Kerr des polaritons. L'étude montre que ce mécanisme de verrouillage de mode est différent de celui obtenu par une approche à base l'absorbant saturable.

En exploitant la forte amplification issue de la non-linéarité optique géante de particules quantiques, les polaritons, les équipes des universités de Montpellier et Clermont-Ferrand, et du CNRS, ont développé un nouveau microlaser de longueur $60\ \mu\text{m}$, produisant des impulsions de $100\ \text{fs}$ à la fréquence de répétition record de plus de $300\ \text{GHz}$. Ce laser à polaritons est réalisé dans un guide d'onde de matériau semiconducteur GaN, et présente de fortes similarités avec les lasers semiconducteurs bleu, violet, et proche ultra-violet commercialisés depuis une douzaine d'années. Mais l'émission laser est ici obtenue par un état cohérent et collectif des polaritons, selon un mécanisme différent de l'inversion de population : le laser à polaritons a été découvert en 1998 dans une géométrie de microcavité verticale, sans guide d'onde [1,2]. Au cours des dix dernières années, les travaux sur les lasers à polaritons dans la géométrie de guide d'onde ont permis de prédire ce mécanisme d'amplification de la lumière [3], de prouver la robustesse des polaritons dans les guides d'onde GaN [4], de réaliser un laser quasi-continu dont l'analyse met en exergue la différence entre les diodes laser GaN « classiques », commerciales, et le laser à polaritons guidés GaN [5]. L'équipe de recherche vient de démontrer [7] la réalisation d'un laser à polaritons impulsional, par blocage de modes, ouvre de nouvelles perspectives pour le développement de lasers impulsionnels pour la photonique intégrée ainsi que pour les microlasers. Une longueur de cavité de l'ordre du



Tiré d'Optica **11**, 962 (2024). ©Optica

millimètre, et l'insertion d'une section dite "d'absorbant saturable", était jusqu'à présent nécessaire pour réaliser de tels lasers impulsionnels à base de semiconducteurs. Grâce à la très forte interaction entre les polaritons, une longueur de cavité de seulement $60\ \mu\text{m}$ est suffisante pour permettre la synchronisation en phase des modes lasers qui pilote le blocage de modes. Ce mécanisme est maintenu jusqu'à température ambiante, sous pompage optique.

Le design est compatible avec les schémas électriques standard et avec une intégration ultérieure dans des circuits photoniques à base de nitrures ciblant la gamme spectrale

NUV-VIS. Lorsque l'injection électrique remplacera le pompage optique dans de tels lasers, leur miniaturisation et leur fréquence d'impulsions en feront des dispositifs très intéressants pour la photonique intégrée. Mais les dispositifs de lasers à polaritons sont aussi particulièrement adaptés à la photonique topologique et la réalisation de fluides quantiques de lumière, sujets qui font actuellement l'objet d'intenses travaux de recherche fondamentale. ●

RÉFÉRENCES

- [1] L. S. Dang et al., *Stimulation of Polariton Photoluminescence in Semiconductor Microcavity*, Phys. Rev. Lett. **81**, 3920 (1998)
- [2] J. Kasprzak et al., *Bose-Einstein condensation of exciton polaritons*, Nature **443**, 409 (2006)
- [3] D. Solnyshkov et al., *Optical amplifier based on guided polaritons in GaN and ZnO*, Appl. Phys. Lett. **105**, 231102 (2014)
- [4] C. Brimont et al., *Strong Coupling of Exciton-Polaritons in a Bulk GaN Planar Waveguide: Quantifying the Coupling Strength*, Phys. Rev. Applied **14**, 054060 (2020)
- [5] H. Souissi et al., *Ridge Polariton Laser: Different from a Semiconductor Edge-Emitting Laser*, Phys. Rev. Applied **18**, 044029 (2022)
- [6] <https://coulomb.umontpellier.fr/-NEWAVE-project-waveguide-polariton-lasers>

POUR EN SAVOIR PLUS

- [7] H. Souissi et al., *Mode-locked waveguide polariton laser*, Optica **11**(7), 962 (2024) et arxiv:2310.18661

Les équipes des universités de Montpellier et Clermont-Ferrand, et du CNRS, ont développé un nouveau microlaser de longueur $60\ \mu\text{m}$, produisant des impulsions de $100\ \text{fs}$ à la fréquence de répétition record de plus de $300\ \text{GHz}$

L'intrication quantique améliore l'optique adaptative

Les microscopes optiques sont essentiels dans la recherche biomédicale, fournissant des informations structurales et fonctionnelles sur les échantillons biologiques de manière non invasive. Cependant, leurs performances sont limitées lorsque les échantillons sont trop épais. Par exemple, un microscope conventionnel ne parvient pas à produire des images nettes au-delà de quelques centaines de microns de profondeur dans les tissus biologiques.

En effet, l'hétérogénéité du milieu à travers lequel la lumière se propage cause des distorsions de l'onde lumineuse, appelées aberrations optiques, qui dégradent considérablement la résolution et le contraste de l'image.

L'optique adaptative englobe des techniques permettant de corriger ces aberrations. Cependant, leur mise en œuvre pratique est souvent complexe. En effet, pour corriger les aberrations, il est nécessaire de les mesurer précisément en amont, ce qui n'est possible que dans des configurations d'imagerie très spécifiques et uniquement pour certains types d'échantillons. En particulier, la présence d'une 'étoile guide' – un point-objet dans l'échantillon – est souvent essentielle. Des physiciens de l'Institut des Nanosciences de Paris, en collaboration avec l'Université de Glasgow, le Laboratoire Kastler Brossel et l'Université de Cambridge, ont proposé une nouvelle approche permettant l'estimation directe des aberrations sans utiliser d'étoile guide, permettant ainsi une correction plus efficace.

Cette technique repose sur une propriété quantique appelée intrication (Figure 1). Dans un microscope, la lumière interagit avec l'échantillon avant d'en former une image sur la caméra. En présence d'aberrations, la propagation de la lumière est perturbée, conduisant à une image floue et de mauvaise qualité. En considérant la lumière non pas comme une onde mais comme un flux de particules, ce phénomène peut être interprété comme si les photons étaient déviés dans des directions aléatoires pendant leur propagation. Si les photons sont intriqués 'spatialement' - c'est-à-dire que leurs directions de propagation sont fortement corrélées - ces déviations aléatoires entraînent une perte de leurs corrélations. En détectant les photons un par un avec une caméra très sensible, il est possible de mesurer la diminution

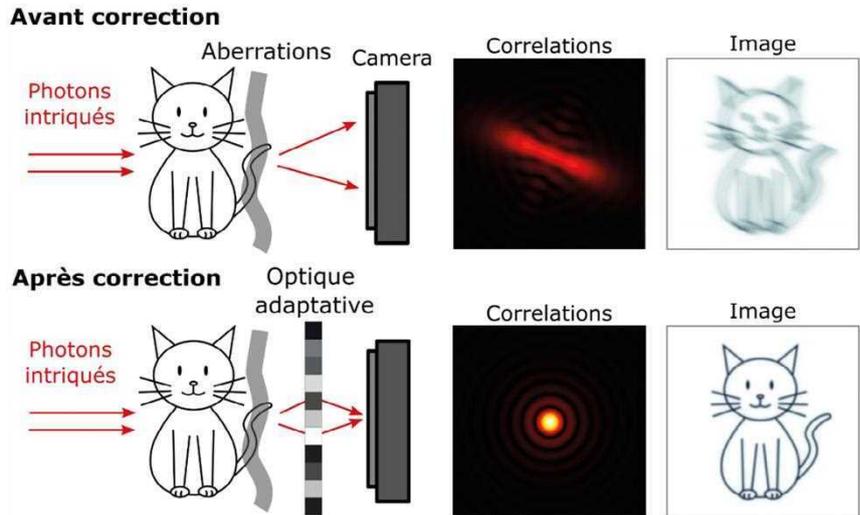


Figure 1. Schéma de principe. La diminution des corrélations entre les photons intriqués permet de quantifier les aberrations dans le microscope. Un algorithme d'optique adaptative rétablit les corrélations, restaurant ainsi une image nette sur la caméra.

des corrélations spatiales et ainsi de quantifier les aberrations. Un algorithme d'optique adaptative utilise ensuite cette mesure pour restaurer les corrélations entre les photons, permettant de retrouver une image nette sur la caméra. Les chercheurs ont par exemple appliqué cette technique dans un microscope à transmission plein champ pour imager la tête d'une abeille en présence d'aberrations (Figure 2).

Capturer des images détaillées à l'intérieur des organismes, des organes et des tissus entiers est un rêve pour les biologistes et

les médecins. Bien que l'optique adaptative permette déjà d'explorer certaines profondeurs tissulaires, ces techniques restent très limitées en pratique. En exploitant l'intrication quantique, les chercheurs repoussent ces limites et améliorent les performances de la microscopie optique en profondeur dans les tissus. ●

RÉFÉRENCE

P. Cameron, B. Courme, C. Vernière, R. Pandya, D. Faccio and H. Defienne, "Adaptive Optical Imaging with Entangled Photons," *Science* **383**, 1142 (2024). DOI:10.1126/science.adk7825

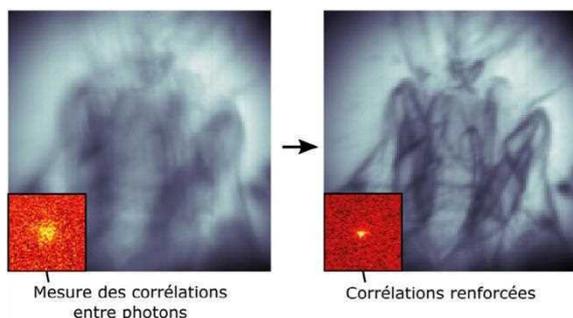
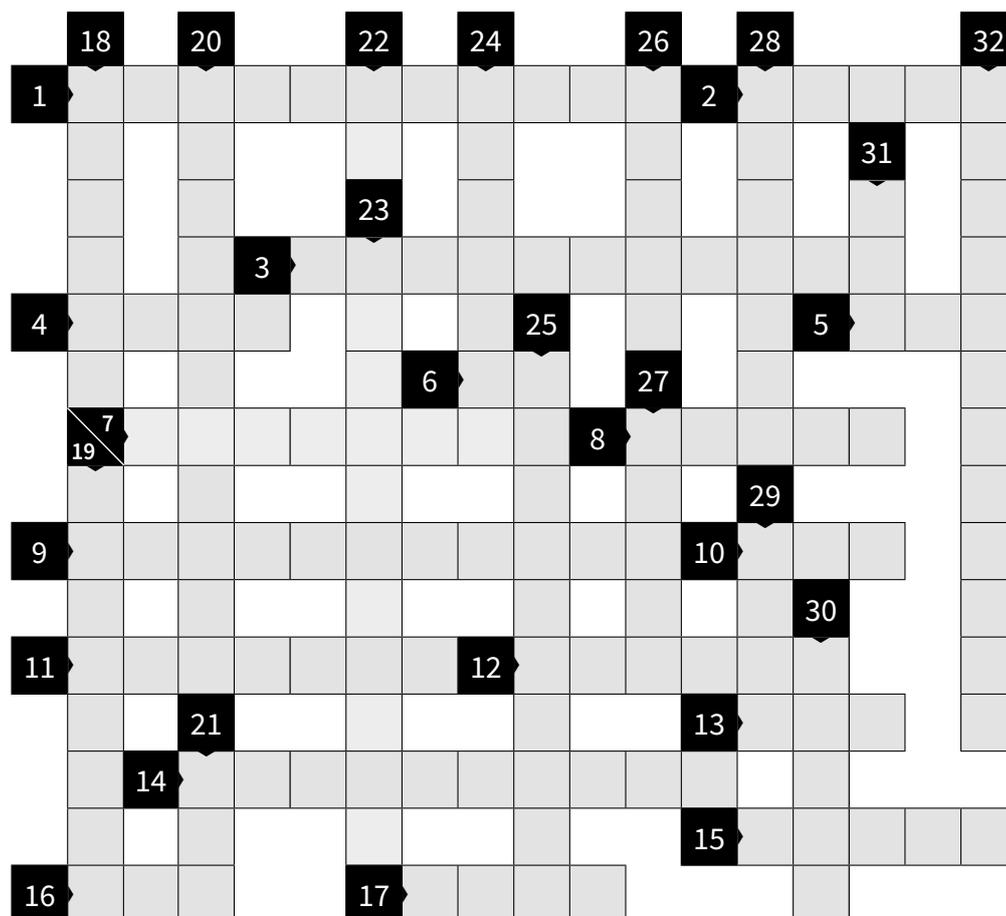


Figure 2. Résultats expérimentaux. Image d'une tête d'abeille acquise au microscope plein-champ en transmission en présence d'aberrations (à gauche) et après correction (à droite). Les images insérées représentent les mesures de corrélations entre les photons.

MOTS CROISÉS SUR LE THÈME ŒIL ET VISION

Par Philippe ADAM



SOLUTION SUR
PHOTONIQUES.COM



- | | | | |
|----|--|----|--|
| 1 | Provoque des mouches volantes | 18 | La DMLA correspond à sa dégénérescence |
| 2 | Là où l'acuité visuelle est maximale | 19 | Globe ou complément de l'objectif |
| 3 | Présents dans la sclérotique et peuvent être à l'origine d'hémorragie | 20 | Technique de collecte des données |
| 4 | Un des plaisirs permis par la vision | 21 | Tomographie à Cohérence Optique |
| 5 | Fonction de Transfert de Modulation | 22 | Composant majeur des verres optiques |
| 6 | Matériau dans les verres optiques, réduit les aberrations chromatiques | 23 | Hors vision |
| 7 | Composants des yeux composés | 24 | Surface limitée par le diaphragme d'ouverture |
| 8 | Solide non cristallin, dur, fragile et transparent | 25 | Vision déformée par une cornée à courbure irrégulière |
| 9 | Lentilles à l'œil | 26 | Rapport entre lumière réfléchie et lumière reçue |
| 10 | Cycle de formation dans une université publique | 27 | Vision sans fin |
| 11 | De vue ou astronomique | 28 | Domaine de l'optique ondulatoire |
| 12 | Vision floue de loin | 29 | Origine de la célèbre phrase : "T'as d'beaux yeux tu sais !" |
| 13 | Sociétés Savantes d'Optique et d'Ophtalmologie | 30 | L'optique peut produire le sien |
| 14 | Techniques des professionnels de santé de l'œil et du système visuel | 31 | Fonction d'étalement du point |
| 15 | Mieux vaut les avoir quand ils sont optiques | 32 | Opération de focalisation avec les yeux |
| 16 | Voit en extrêmement grand | | |
| 17 | Membrane de l'œil... mais pas UV | | |



TÉMOIGNAGE D'ENTREPRENEUR

Jean-Luc Gach, First Light Imaging

Photoniques s'entretient avec Jean-Luc Gach, co-fondateur et directeur technique de l'entreprise First Light Imaging.

COMMENT AVEZ-VOUS DÉCOUVERT L'OPTIQUE ET L'ASTRONOMIE ?

Travailler dans l'astronomie était un rêve depuis mes 12 ans. Mon père m'avait emmené visiter l'Observatoire de Haute-Provence. J'ai ainsi suivi des études scientifiques. J'ai tout d'abord obtenu mon diplôme d'ingénieur INSA à Lyon en 1994, cursus Génie Electrique avant de suivre un DEA à Nice en imagerie de l'univers. Ce DEA comportait une partie imagerie médicale et une partie imagerie de la Terre et de l'univers. J'ai ensuite effectué une thèse de 1995 à 1998 à l'Observatoire de Marseille. Mais il y a eu dans ce laboratoire une opportunité de poste permanent à saisir avant la fin même thèse. C'est ainsi que je suis devenu ingénieur d'étude pour l'université de Provence (aujourd'hui Aix-Marseille Université) dans ce laboratoire avant même d'avoir soutenu ma thèse. Mais je finirai au final par soutenir ma thèse 20 ans après, à l'université d'Aix-Marseille.

QUELLE ÉTAIT VOTRE ACTIVITÉ DANS CE LABORATOIRE ?

Je travaillais dans une équipe spécialisée dans la détection de photon unique. Il ne s'agissait pas d'imagerie conventionnelle. Tout mon parcours a été guidé par la recherche de sensibilité. Je travaillais sur des imageurs à amplification. Les principales technologies étaient l'imagerie par tube amplificateur. Nous avons été la première équipe à mettre en place des photocathodes en GaAs. Il y a eu une longue période sur le développement des EMCCD (Electron Multiplying CCD). Nous sommes parvenus en 2001 à démontrer la détection et

le comptage de photons avec ce nouveau type de détecteur. Nous avons également travaillé sur les e-APD, où le phénomène d'amplification se fait par l'intermédiaire des électrons. J'ai soutenu ma thèse en 2018 à l'université d'Aix-Marseille en présentant mes principaux travaux et résultats sur ces thématiques.

VOS TRAVAUX SUR LES EMCCD SERONT À L'ORIGINE DE LA CRÉATION DE FIRST LIGHT IMAGING.

Oui, en 2002, je participe à une conférence à Hawaï où je présente des premiers résultats sur les EMCCD. Philippe Feautrier vient me voir à la fin de ma présentation en me proposant de monter un projet européen sur le développement d'un capteur de front d'onde sur cette technologie pour l'optique adaptative des grands télescopes. Et ce projet est finalement accepté par l'Europe. On a un premier prototype de caméra en 2005 que l'on présente à une conférence.

Il y a une partie optique et la partie capteur-imageur. Le challenge était d'être à la fois très sensible et très rapide. Sensible pour détecter des photons uniques, et rapide pour atteindre des fréquences de plusieurs kHz. Nous sommes parvenus à associer des bonnes performances sur ces 2 aspects. A partir de là, de nombreux observatoires nous demandent de dupliquer ce prototype de caméra pour leurs usages. Nous nous tournons alors vers le service valorisation de l'université. Nous trouvons un industriel intéressé par développer la technologie. Cet industriel était Andor Technology. Nous étions prêts à signer

un contrat, mais la crise financière de 2008 vient perturber ce partenariat, et de ce fait, Andor Technology ne souhaite plus investir. Nous nous sommes retournés vers le service valorisation de l'université qui nous suggère alors de créer notre entreprise, ce que nous fîmes. Nous rentrons en incubation en 2009 au sein de l'incubateur Impulse.

COMMENT S'EST CRÉÉE L'ENTREPRISE ?

Nous nous sommes rapprochés de David Boutolleau, un ami d'enfance qui avait toutes les compétences pour diriger l'entreprise. Nous décrochons le concours CNACETI, l'équivalent du prix i-Lab. Et en 2011 nous obtenons notre premier client, l'ONERA, nous amenant à déposer rapidement les statuts de l'entreprise. Nous sommes au départ localisés au sein du LAM (Laboratoire d'Astronomie de Marseille), où nous sommes restés jusqu'en 2012. Après un court passage au Technoptic en 2012, nous nous sommes installés jusqu'en 2017 dans la pépinière d'entreprises à Meyreuil, commune à proximité d'Aix-en-Provence (13). Entre 2017 et 2021, nous avons intégré l'hôtel technologique également situé à Meyreuil et en 2021, nous nous sommes installés dans nos propres locaux à Meyreuil.

QUELLES ONT ÉTÉ LES PRINCIPALES ÉTAPES DE DÉVELOPPEMENT DE VOTRE ENTREPRISE ?

Nous avons mis en place notre propre équipe de recherche dès 2011. Nous avons pu bénéficier d'aides importantes en termes de financements et d'allègements fiscaux par l'intermédiaire du

crédit impôt recherche. Une étape importante a été par la suite l'obtention d'un gros projet européen dans l'appel instrument PME pour travailler entre 2012 et 2015 sur la mise sur le marché de la technologie e-APD pour le comptage de photons dans l'infrarouge. L'e-APD est le pendant IR des EMCCD permettant aussi d'associer vitesse et sensibilité. Nous avons été l'un des 5 projets français à être sélectionnés. Ce projet nous a permis de mettre sur le marché en 2015 la première caméra infrarouge basée sur des e-APD. Ces caméras sont difficiles à développer car elles fonctionnent à très basse température et nécessitent des chambres à vide, mais nous sommes parvenus à les rendre « presse-bouton » pour les utilisateurs. Nous avons pris un risque important en développant cette caméra car il s'agissait d'une technologie de rupture. Nous avons consacré beaucoup d'efforts en technologie et en instrumentation pour la rendre facile d'utilisation. Mais

cet investissement et la prise de risque se sont avérés payants car la caméra a rencontré un succès commercial. Aujourd'hui, elle représente une part importante de notre chiffre d'affaires.

COMMENT AVEZ-VOUS DIVERSIFIÉ VOTRE GAMME DE PRODUITS ?

Nous avons cherché à développer en parallèle des produits avec une gamme moins exclusive. Notre objectif était de transposer les recettes développées pour cette caméra pour une gamme de caméras IR basées sur une technologie InGaAs, une technologie différente de l'e-APD. Nous avons cherché à appliquer notre savoir-faire acquis sur la caméra haut de gamme sur une gamme construite sur des capteurs standard. Nous avons ainsi pu développer une nouvelle gamme de caméras infrarouges. De la même manière, nous avons développé une gamme de caméras CMOS dans le visible en détournant

un capteur destiné à l'imagerie industrielle et en l'intégrant dans un environnement scientifique. Nous avons été les premiers à suivre cette approche.

QUELS SONT LES PRINCIPAUX MARCHÉS VISÉS PAR VOTRE GAMME DE COMPOSANTS ?

L'entreprise s'est créée sur l'astronomie et au fur et à mesure que nous avons développé notre gamme de produits, nous avons diversifié nos applications. Nous proposons nos caméras pour l'imagerie biomédicale, pour des applications telles que l'imagerie *in-vivo* du petit animal ou la microscopie par fluorescence. Nous sommes également présents dans la R&D pour l'industrie, en particulier l'industrie du semi-conducteur et le debugging de puce, ou encore l'inspection de panneaux solaires. Nous avons également développé des produits dédiés à la caractérisation spatiale de faisceau laser (beam laser profiling) jusqu'à 2 µm. Nous avons cherché des applications ●●●

50th Anniversary
ECOC2024
 FRANKFURT
ECOC EXHIBITION



SAVE THE DATE

23-25 SEPTEMBER 2024

FRANKFURT, GERMANY

Find out more at: www.ecocexhibition.com



dans l'hyperspectral, et dans les télécommunications laser pour lesquelles nous avons développé des solutions, en particulier des caméras pour les détecteurs de front d'onde à 1550 nm.

CONSERVEZ-VOUS UN LIEN PRIVILÉGIÉ AVEC L'ASTRONOMIE ?

Nous venons de l'astronomie, nous connaissons très bien ce milieu scientifique, et ce milieu scientifique nous connaît très bien. Des projets dans ce secteur se révèlent très intéressants pour nous. En particulier, nous rentrons sur le marché New Space en développant des caméras infrarouges pouvant être déployées dans l'espace. Mais les programmes dans ce secteur se déploient sur des grandes échelles de temps et nous n'avons pas encore de produit dans l'espace. La détection de gaz à effet de serre, CO₂ et CH₄ en particulier, est une application qui nous intéresse beaucoup et nous sommes d'ores et déjà capables de fournir des solutions pour les satellites dédiés à la surveillance de ces gaz dans l'atmosphère terrestre.

QUELS SONT VOS PROJETS RÉCENTS EN RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT ?

Venant d'un laboratoire de recherche, nous connaissons bien le monde académique et avons engagé de nombreux projets collaboratifs. Nous sortons par exemple d'un projet collaboratif FUI avec le CRCM et l'Institut Fresnel pour développer une caméra pour la microscopie par fluorescence dans le visible. Nous allons également travaillé avec le Laboratoire d'Astronomie de Marseille sur le développement

de senseur de front d'onde pour les très grands télescopes dans l'infrarouge. Nous allons déposer un projet européen pour l'astronomie solaire dans l'infrarouge.

COMBIEN DE SALARIÉS TRAVAILLENT AUJOURD'HUI CHEZ FIRST LIGHT IMAGING ?

Nous employons 35 personnes et générons un chiffre d'affaires de 8 millions d'euros. Nous avons beaucoup recruté ces 3 dernières années, depuis notre aménagement dans nos locaux. Notre activité s'est aussi fortement accélérée.

DANS QUEL CONTEXTE ET QUELLES CIRCONSTANCES S'EST DÉROULÉ LE RACHAT RÉCENT DE L'ENTREPRISE ?

Jusqu'en 2024, notre croissance était une croissance organique, et nous n'avions jamais fait rentrer d'investisseur. Nous étions arrivés à une étape où il nous fallait évoluer. Il fallait soit trouver un investisseur, soit nous adosser à un plus

gros industriel. Nous avons privilégié la seconde option et nous nous sommes tournés vers Oxford Instruments Andor (le groupe Oxford Instruments a acquis Andor Technology Ltd en 2014) car nous avons une gamme de produits complémentaires. Nous ciblions de plus des domaines qu'ils ne couvrent pas. Ainsi, nous leur apportons une gamme de produits qu'ils ne possédaient pas en catalogue et nous bénéficions de leur réseau de distribution. Oxford Instruments a accepté ce partenariat mais nous a proposé de racheter l'entreprise pour pouvoir s'engager pleinement. Cette acquisition a été validée rapidement par les services de l'Etat. L'assise du groupe Oxford Instruments Andor nous amène une forte renommée et un bond au niveau marketing. Ce qu'ils achètent, c'est avant tout un savoir-faire et une équipe possédant une grande expertise.

COMMENT ABORDEZ-VOUS LES PROCHAINES ANNÉES ? QUELS SONT LES PROCHAINS DÉFIS À RELEVER ?

Nous aimerions démocratiser l'imagerie infrarouge, changer d'échelle et apporter des technologies pointues dans l'infrarouge, en proposant toujours de très hautes performances, mais également en diminuant les coûts. Car une démocratisation de l'imagerie infrarouge passera nécessairement par une technologie plus abordable, et relever ce défi est ce qui nous motive pour les prochaines années. ●

À gauche, la toute première caméra OCAM, intégrant un capteur EMCCD, en 2005. A droite, la caméra OCAM², aujourd'hui.





Entretien avec Claude Boccara

Professeur à l'ESPCI, spécialiste de la photothermie et de l'imagerie en milieux diffusants.

COMMENT AVEZ-VOUS DÉCOUVERT L'OPTIQUE ?

À l'école, je pense pouvoir dire avec une légère pointe d'humour que j'étais mauvais en tout sauf en gymnastique. Mais mes bonnes notes en mathématiques m'ont permis de rentrer en classe préparatoire. Sous l'impulsion du CEA, des écoles préparatoires avaient inclus des cours en physique. Et c'est en classe préparatoire que j'ai eu le coup de foudre pour l'optique. J'ai alors souhaité poursuivre dans cette voie en intégrant l'Institut d'Optique. J'ai beaucoup aimé l'ambiance et les enseignements. C'est à l'institut d'optique que j'ai découvert la recherche, un domaine que je ne connaissais pas. Beaucoup d'élèves souhaitaient poursuivre en recherche, et c'est dans cet environnement propice que j'ai souhaité poursuivre en thèse.

COMMENT AVEZ-VOUS CHOISI VOTRE SUJET DE THÈSE ?

J'ai découvert l'équipe dans laquelle j'allais poursuivre en thèse un peu par hasard : j'étais président de l'association des élèves de l'institut d'optique et nous avons organisé une visite du laboratoire d'optique de l'école de Physique et Chimie de la ville de Paris. Il s'avère que tous les élèves prévus pour cette visite ont décliné à la dernière minute leur devis d'honorer cette visite. C'est ainsi que j'ai visité seul l'équipe d'optique physique de Jacques Badoz, qui m'a montré les installations montées par cette équipe de recherche. J'étais émerveillé et Jacques Badoz m'a incité à me présenter au concours d'entrée du CNRS. J'ai suivi son conseil et c'est ainsi que je suis rentré au CNRS. J'ai naturellement poursuivi en thèse dans cette équipe sur le sujet de la spectroscopie optique dans les solides. Je travaillais sur le

dichroïsme d'ions de terre rare dans des matrices cristallines anisotropes, isotropes ou vitreuses. L'ambiance de travail dans l'équipe était très bonne. Dans la dernière partie de ma thèse, j'ai du faire mon service militaire à l'École Polytechnique où j'ai travaillé sur les matériaux laser, en lien avec la DRME (aujourd'hui DGA). Nous travaillions sur la spectroscopie Raman dans les verres dopés pour détecter des impuretés, des modifications de structure qui induisaient des endommagements laser. Après ma thèse à l'université Pierre et Marie Curie (aujourd'hui Sorbonne université), je suis parti à Los Angeles aux États Unis, pour travailler sur des effets para-élastiques. Le principe de cette approche est d'appliquer un champ magnétique qui induit une anisotropie dans le milieu, et de mesurer les effets sur les ions par spectroscopie optique. Nous avons poussé les mesures à leur limite. Au bout d'un an, je suis rentré à Paris reprendre mes activités de recherche au laboratoire d'optique de l'école de physique et chimie. Je souhaitais alors faire évoluer mes sujets de recherche.

C'EST À VOTRE RETOUR QUE VOUS TRAVAILLEZ SUR LA PHOTOTHERMIE

Des groupes avaient déjà utilisé l'effet photoacoustique, au Bell's Lab. En envoyant de la lumière sur un matériau dans une enceinte fermée et en modulant périodiquement cet éclairage, il est possible d'induire une modulation périodique de température du matériau, qui elle-même induit une onde acoustique dans le gaz de l'enceinte, onde que l'on détecte avec un microphone. Avec Michel Fournier, nous avons proposé une variante purement optique de cette approche pour mesurer la température.

POUVEZ-VOUS NOUS PRÉSENTER LE PRINCIPE DE LA PHOTOTHERMIE ?

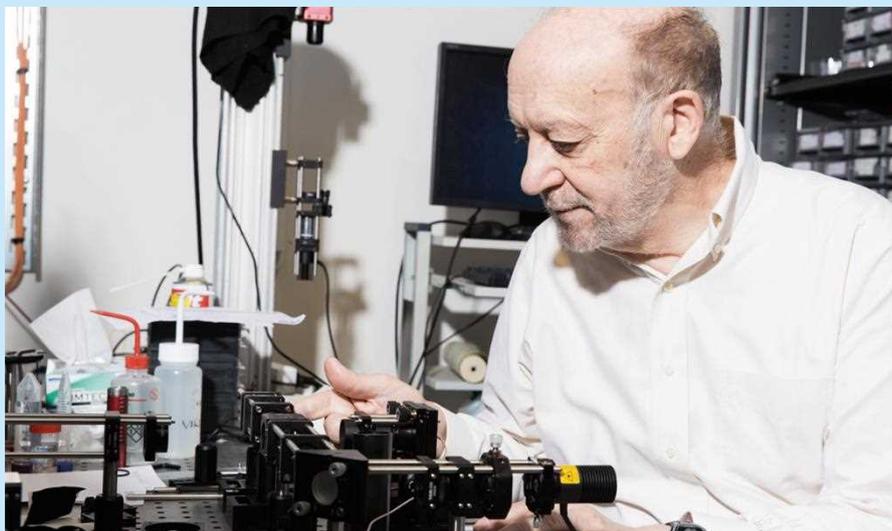
Nous avons proposé de mesurer l'élévation de température par effet mirage. Le faisceau laser est défléchi au dessus d'une surface chauffée. Nous avons présenté cette approche pour la première fois dans un congrès en 1979. Par la suite, cette méthode qui semblait à première vue comme fondamentale a été appliquée dans beaucoup de domaines. On l'a tout d'abord appliquée à des matériaux très absorbants, mais l'approche s'avère pertinente pour les matériaux très transparents. On mesure l'énergie qui est déposée, au lieu de mesurer l'absorption par mesure indirecte, on mesure directement l'énergie qui est déposée, sans effectuer de bilan d'énergie. Nous pouvions mesurer des pertes de 10⁻⁷ dans des couches minces. Ces mesures thermiques un peu exotiques, n'intéressaient au départ que très peu de monde. Mais nous avons pu utiliser ces mesures photothermiques pour mesurer l'écoulement de la chaleur dans des milieux complexes comme des céramiques, des surfaces rugueuses. Un deuxième résultat important permis par cette méthode de mesure des faibles absorptions a été la capacité de mesurer les pertes optiques sur des composants optiques de qualité ultime. J'ai interagi avec Alain Brillet qui dirigeait Virgo en France et Jean-Marie Mackosky du laboratoire des matériaux avancés à Lyon. J'ai été chargé de la métrologie Virgo pour mesurer des pertes par absorption dans les traitements de silice et le volume des blocs de silice qui servaient de surface. Virgo concevait les optiques les plus propres qu'on pouvait imaginer. J'ai pu encadrer la thèse de Vincent Loriette sur ce sujet.

VOUS AVEZ ÉGALEMENT FAIT PARTIE DES PREMIÈRES ÉQUIPES À TRAVAILLER SUR LE CHAMP PROCHE OPTIQUE.

J'ai effectivement commencé à travailler dès le début des années 1990 sur ce domaine émergent qu'était le champ proche optique. Nous cherchions à obtenir des résolutions spatiales nanométriques. Nous avons travaillé avec des pointes métalliques pour perturber très localement le champ. Nous avons compris par la suite que cette pointe agissait comme une antenne optique efficace. Nous cherchions à avoir des contrastes optiques à une échelle sub-longueur d'onde et nous avons pu voir des effets locaux sur une surface métallique en or. J'ai notamment encadré la thèse de Renaud Bachelot sur ce sujet.

COMMENT AVEZ-VOUS FAIT ÉVOLUER VOS THÈMES DE RECHERCHE VERS LES MILIEUX DIFFUSANTS ?

A la même époque, au début des années 1990, j'avais lu quelques articles sur des méthodes pour faire de l'imagerie dans les milieux biologiques. J'ai pu prendre le train en route et nous avons proposé de faire de la tomographie optique dans les milieux biologiques (lire par exemple *Photoniques* 95, 39 – 43 (2019) ; *Photoniques* 123, 31 – 35 (2023)). J'ai travaillé au début avec Emmanuel Beaufaire (LOB) et Arnaud Dubois (IOGS) sur la tomographie cohérente. Ces travaux ont très bien marché et se poursuivent encore aujourd'hui. Un sujet très porteur dans les milieux diffusants est celui de la photoacoustique. Dans un milieu diffusant, la lumière va être absorbée par le sang, engendrant un échauffement qui engendre l'émission d'une onde acoustique. Si vous êtes capable de mesurer ces ondes acoustiques, vous êtes alors capable de mesurer la cartographie des zones absorbantes. Si on envoie de la lumière sur un matériau biologique, vous obtenez un speckle. Si vous envoyez des ultrasons, vous modulez le speckle, c'est ce qu'on appelle la photoacoustique.



QUELLES ÉTAIENT LES MOTIVATIONS POUR CRÉER L'INSTITUT LANGEVIN ?

Il y a une quinzaine d'années, avec Mathias Fink, nous avons décidé de créer un laboratoire afin de mettre en commun les approches développées dans le contrôle des ondes en optique et en acoustique. En optique, il était beaucoup plus difficile de contrôler les ondes. Cette époque correspondait à la publication des travaux du groupe d'Alard Mosk qui parvenait à focaliser sur une onde à travers un milieu diffusant. Avec Sylvain Gigan et Sébastien Popoff, nous avons rebondi sur la proposition de Rémi Carminati de mesurer toute la matrice de diffusion. Nous avons beaucoup bénéficié des concepts et des outils qui avaient été développés en acoustique. C'est en ce sens que la création de l'Institut Langevin a été une réussite.

COMMENT VOUS ÊTES-VOUS IMPLIQUÉ DANS LA VALORISATION DE VOS RECHERCHES ?

Nous avons créé une start-up qui s'appelait LLtech, qui est depuis partie aux Etats Unis et qui s'appelle aujourd'hui Acquired Sensors. Elle avait pour but de faire des diagnostic post opératoire. Nous cherchions à savoir si des cellules cancéreuses restaient présentes après une opération. J'ai également travaillé avec ma sœur qui est biologiste dans la détection de virus. Nous avons pu créer il y a une dizaine d'années une entreprise qui s'appelle Myriad. Cette entreprise est aujourd'hui basée sur Paris. Plus récemment, nous avons créé une entreprise de tomographie optique qui s'appelle SharpEye. Nous

avons eu beaucoup de chance en obtenant un contrat européen Synergie Grant avec Mathias Fink et José Sahel de l'institut de la vision. Ce projet nous a permis de développer des outils pour l'œil avec Michel Bach et ma doctorante Kate Grieve.

SUR QUELS DOMAINES PORTENT VOS TRAVAUX ACTUELS ?

Je travaille essentiellement sur l'œil et les milieux diffusants. Je travaille sur la tomographie par transmission.

VOUS DÉMONTREZ UNE VRAIE PASSION POUR L'OPTIQUE

Oui, j'aime beaucoup ce sujet. Je continue à aller au laboratoire quotidiennement et à aller en conférence, comme à Photonics West. J'aime bien me tenir au courant des développements technologiques. J'ai encadré une soixantaine de doctorants et j'ai eu de la chance d'avoir des étudiants très stimulants, ça compte vraiment. Beaucoup ont continué dans la recherche et le milieu de l'optique, comme par exemple Renaud Bachelot, Kate Grieve, Sandrine Lévêque Fort, ...

QU'AVEZ-VOUS LE PLUS APPRÉCIÉ À L'ESPCI ?

Ce que j'ai toujours aimé à l'ESPCI, c'est qu'il n'y a pas de barrière entre physique, chimie et biologie, et pas de barrière entre fondamental et appliqué, et c'est notamment vrai à l'Institut Langevin qui a été à l'origine de création de nombreuses entreprises et start-up. Nous avons eu la chance d'avoir dans l'établissement Daphnée Raffini qui est d'une aide précieuse pour l'innovation et la valorisation de nos résultats. ●

Nouvelles technologies de micro-affichage pour les lunettes connectées

Les casques de réalité virtuelle (VR), de réalité augmentée (AR) ou de réalité mixte (MR) et les lunettes intelligentes ont fait l'objet de nombreuses attentes au cours de la dernière décennie. Cependant, malgré leur potentiel, ces appareils n'ont pas été largement adoptés par les consommateurs, en partie à cause du manque de cas d'utilisation universels, ainsi que de problèmes de confort. Mais ces casques et lunettes ont connu du succès sur les marchés des entreprises, de l'industrie et de la défense, où ils répondent à des cas d'utilisation spécialisés et à des applications de niche. Les développements technologiques – dont beaucoup sont rendus possibles par l'optique et la photonique – pourraient contribuer à combler ce fossé.



<https://doi.org/10.1051/photon/202412723>

Bernard KRESS*

Président de SPIE 2023 et directeur XR Hardware chez Google

* bernard.kress@gmail.com

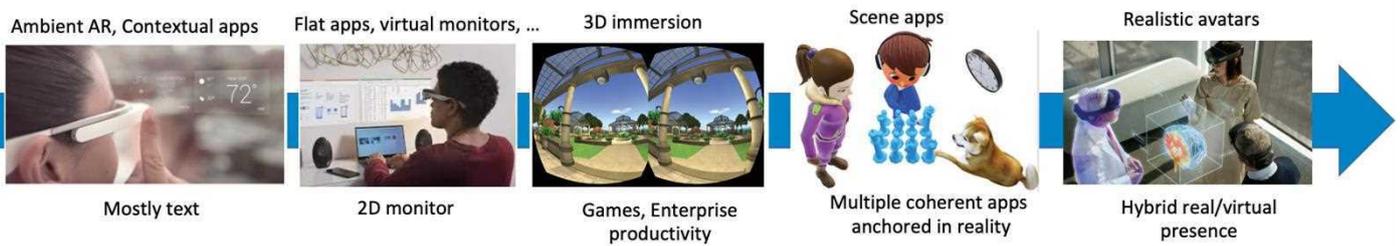
Loptique et la photonique sont au cœur de tous les systèmes AR, VR et MR, servant d'éléments de base pour les sous-systèmes d'affichage, d'imagerie et de capteurs. L'ensemble du sous-système d'affichage (Display Sub Assembly ou DSA), l'ensemble du sous-système d'imagerie (Imaging sub Assembly ou ISA) et l'ensemble du sous-système de capteur (Sensing Sub Assembly ou SSA) sont intimement liés entre eux et calibrés de manière croisée pour offrir la meilleure expérience immersive à l'utilisateur. Alors que les premiers casques AR utilisaient des composants de plate-forme existants, il est désormais nécessaire de développer des éléments technologiques spécifiques pour chacun. Dans cet article, nous nous concentrerons sur le sous-système d'affichage. Le DSA comprend généralement trois parties : le moteur d'affichage dans lequel l'image est générée ; le combineur optique, qui combine l'affichage et la scène transparente ; et la pile transparente qui comprend toutes les optiques supplémentaires, les verres de prescription de vision, les visières de protection ainsi que les capteurs (suivi oculaire et pupillaire, reconnaissance de l'iris, suivi des expressions du visage, détection des gestes) ainsi que les technologies de gradation de transparence (globales ou pixellisées).

Cas d'utilisations des diverses architectures de systèmes AR portables

Systèmes d'affichage

Les systèmes d'affichage conventionnels pour les casques VR utilisent aujourd'hui des panneaux LCD ou AMOLED, tandis que les casques AR et les lunettes intelligentes utilisent des panneaux à micro-affichage comme LCoS (Liquid Crystal on Silicon), DLP (Digital Light Processing), micro-OLED et, plus récemment, micro-LED. Les systèmes de scanner à faisceau laser MEMS (Laser Beam Scanning ou LBS), initialement développés pour les applications de télécommunications, ont été largement utilisés dans les lunettes intelligentes et les casques MR. Cependant, les systèmes LBS ●●●

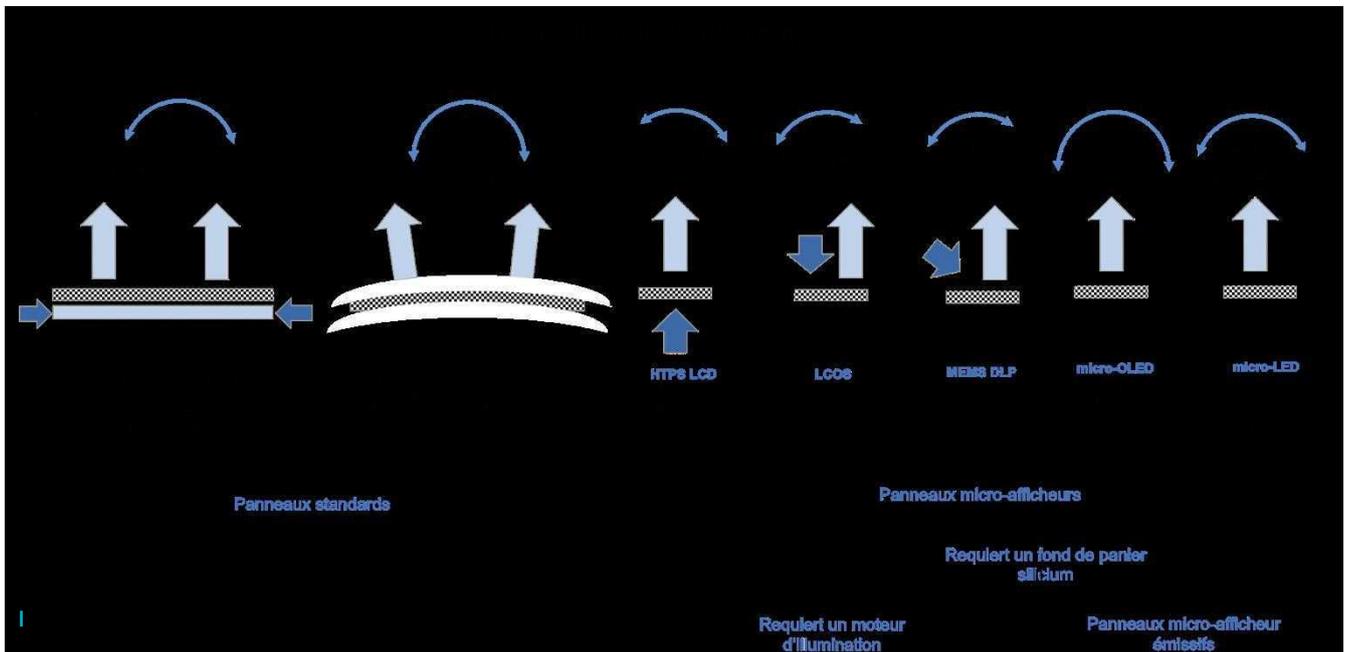
	Lunettes audio	Lunettes monoculaire	Lunettes binoculaires	Casque AR	Transparence optique	Transparence vidéo
Poids	<30 g	<45 g	<75 g	<150 g	<400 g	<600 g
Forme	Lunettes connectées	Lunettes connectées	Lunettes connectées	Grandes lunettes	Casque OST	Casque VST
Puissance requise	<1/2W	<1W	<1.5W	<2.5W	<6W	<8W
Immersion	Audio	<20 deg de champ monoculaire	20-30 deg de champ Binoculaire	30-50 deg de champ Binoculaire	>50-70 deg de champ Binoculaire	>90 deg de champ
Ancrage du display	Pas de display, Ancrage audio	Ancrage tete ou corps	Ancrage externe	Ancrage externe	Occlusions, Ancrage externe	All of the above
Senseurs	Camera, audio, IMU,...	+ , Wink, ...	+ 3 DOF HeT	+ 6 DOF HeT, Gesture sensing,	+ Face tracking, spatial mapping	All of the above
Cas d'usage	Apps audio	+ Display contextuel	+ Flat apps	+ 3D apps	+ Scene apps, holoportation	+ realistic avatars
Marché	Consomateur		Professionnel		Entreprise	
Exemples produits	Ray Ban stories, Bose, Echo frames	Google Glass, Tooz smart glasses,...	Vuzix Blade, Digilens Crystal 30,...	nReal light, Lenovo A3 ThinkReality, ,...	Magic Leap 2, Hololens 2,	Lynx VR, Oculus Quest Pro, Apple vision Pro...

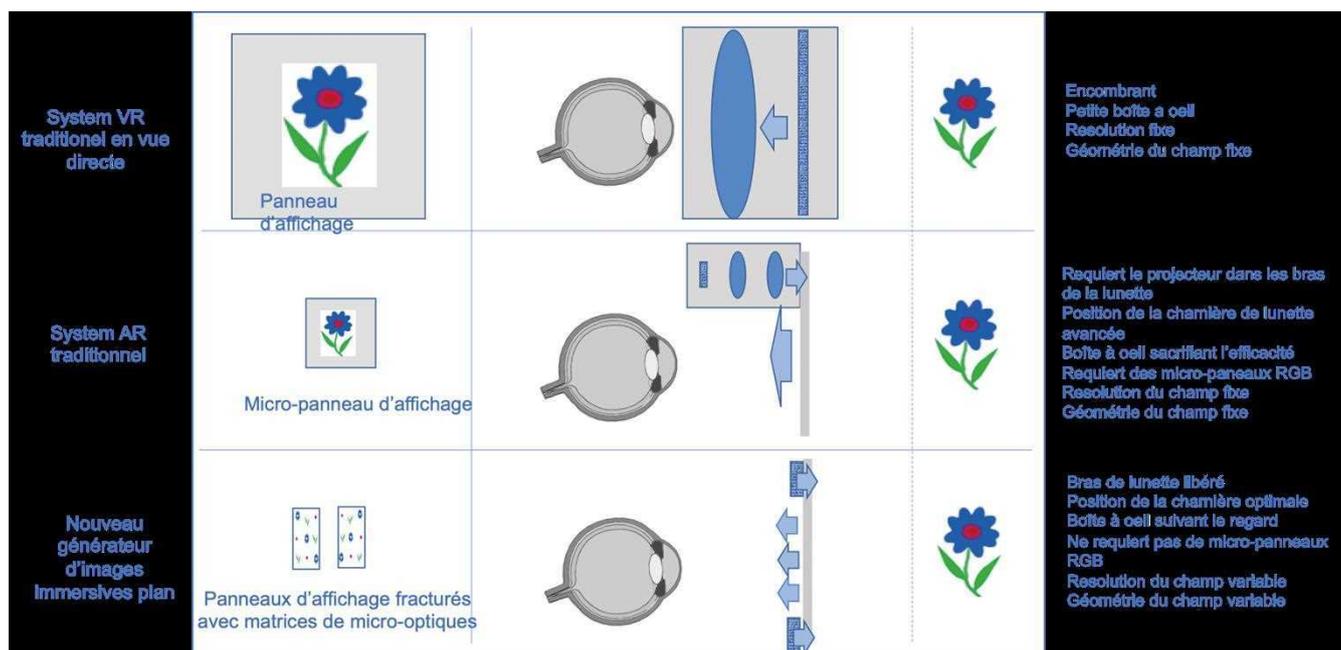


sont confrontés à des défis lorsqu'ils sont intégrés à des guides d'ondes diffractifs en raison de problèmes de cohérence temporelle, tels que l'uniformité des couleurs (liées aux multiples interférences dans le guide) et la petite taille de la pupille de sortie, ainsi que des complexités découlant de la commande de l'électronique et de l'espace requis par les diverses puces à mesure que le système de numérisation devient plus complexe. Pour les systèmes AR compacts, les panneaux micro-LED pourront offrir bientôt des avantages incontestables car ils sont émissifs, ne nécessitent aucun système d'éclairage et peuvent fournir les images les plus lumineuses (> 1 million de nits au niveau du panneau). Cependant, aujourd'hui, la mise en œuvre d'un système d'affichage micro-LED RVB complet nécessite

Figure 1. Cas d'usage de divers produits AR et VR, et systèmes nécessaires pour leur implementation.

l'alignement de trois panneaux monochromes R, V et B sur un X-cube miniature, ce qui présente des défis importants pour un système compact et des prix abordables pour le public. Les panneaux intégrés R,V et B en microLED ne sont toujours pas disponibles sur le marché, malgré des investissements et un développement considérables depuis plus d'une décennie. La sortie de lumière polarisée des panneaux d'affichage est souhaitable, en particulier lorsque le combineur est plus efficace pour une polarisation que pour l'autre, comme on le voit





avec les guides d'ondes holographiques ou les guides d'ondes à réseau de relief de surface (Surface Relief Gratings, ou SRGs). Les guides d'ondes géométriques réfléchissants (de type Lumus en verre ou LetinAR en plastique), en revanche, offrent une efficacité similaire pour les deux polarisations, ce qui les rend mieux adaptés aux moteurs d'affichage non polarisés.

Consommation énergétique

La consommation d'énergie est une préoccupation cruciale pour les lunettes intelligentes utilisables toute la journée. Pour de telles lunettes, pour lesquelles un affichage immersif complet comme les casques MR n'est peut-être pas nécessaire, le nombre moyen de pixels actifs (Average Pixel Lit ou APL) dans les cas d'utilisation typiques peut être réduit à moins de 10 %, voire 5 % (affichage contextuel simple ou affichage AR ambiant). Ceci est particulièrement avantageux lors de l'utilisation d'écrans émissifs tels que les microLED et les LBS (dans une moindre mesure les microOLED). Les systèmes d'affichage MicroLED et LBS nécessitent généralement une faible consommation d'énergie pour un APL faible, mais consomment beaucoup plus d'énergie pour un APL plus élevé que leurs homologues non émissifs (LCoS et DLP). Cela définit leur meilleur ajustement pour la RA ambiante et l'affichage contextuel dans les lunettes intelligentes ($1/4W$ pour le DSA). Pour les casques dotés de batteries plus grosses capables de fournir plus de puissance au système (jusqu'à 6-8 W pour l'ensemble du système de lunettes), un APL plus élevé et plus adapté aux cas d'utilisation en MR immersive peut être affiché, comme le montrent les casques HoloLens et Magic Leap.

La réduction de la taille de la zone active des LED à des tailles de pixels et des pas similaires à ceux du LCoS, du DLP ou du micro-OLED entraîne une efficacité réduite en raison de la

Figure 3. Architectures d'affichage conventionnels VR et AR et afficheurs de nouvelle génération tout-en-un planaires.

recombinaison des bords et d'autres effets parasites. Diverses techniques, telles que le pick and place, ont été étudiées, mais se sont révélées non évolutives pour les écrans AR. Les microLED monolithiques RVB (rouge, vert, bleu) sont devenues l'architecture ultime pour beaucoup. Cependant, la génération de couleurs rouges reste difficile dans le GaN/InGaN monolithique malgré les pixels bleus et verts efficaces produits par le GaN conventionnel et les pixels rouges efficaces par AlInGaP. Certaines entreprises ont exploré l'utilisation de nanofils verticaux pour augmenter la surface effective des pixels, tandis que d'autres utilisent la conversion de points quantiques (Quantum Dots) pour le vert et le rouge, tout en maintenant l'émission naturelle du bleu du GaN, et même la conversion avec des couche Perovskites plus adaptées au processus intégré sur Silicium. L'intégration RVB monolithique dans un seul panneau d'affichage reste un Saint Graal pour de nombreuses start-ups microLED.

Les panneaux micro-LED sont idéaux pour le nouveau système d'affichage AR « tout-en-un » fin, ce qui en fait des sources d'images souhaitables pour les nouvelles architectures DSA comme celles de Lusovu et NewSight Reality. Ces architectures peuvent combiner des micropanneaux monocolores séparés utilisant des MLA (Micro Lens Array, ou MLAs) transmissifs ou réfléchissants non uniformes pour non seulement générer l'image, mais également créer synthétiquement un champ de vision (FOV), une boîte à oeil, une couleur et même obtenir un affichage fovéal et un champ lumineux. Un tel système d'affichage peut être réglé dynamiquement lorsqu'il est lié à un dispositif de suivi de la pupille/du regard pour réduire la consommation d'énergie globale en générant la boîte ●●●

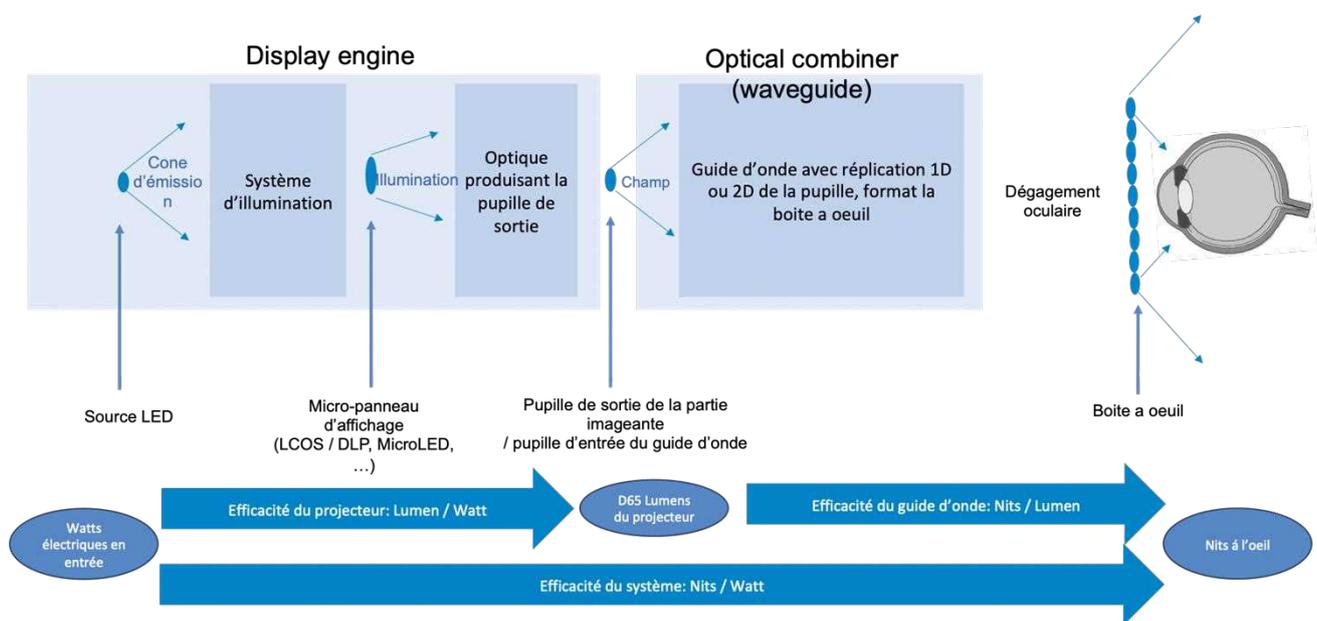


Figure 4. Efficacité d'un système d'affichage AR, découplant le projecteur du combineur optique

à œil et la résolution angulaire la mieux adaptée (orientation de la pupille, affichage fovéal, modulation de luminosité, couleur, format du champ de vision,...). Grâce à de tels systèmes, la luminosité de l'œil peut être supérieure à celle de l'écran, ce qui les rend également adaptés aux panneaux microOLED. Dans les architectures DSA conventionnelles, l'efficacité dépend à la fois du moteur d'affichage et du combineur, l'efficacité du guide d'onde étant souvent définie en Nits/Lumens. La correspondance de l'étendue est cruciale pour augmenter l'efficacité du moteur d'affichage, les écrans émissifs (microOLED ou microLED) étant lambertiens et les écrans non émissifs (LCOS et DLP) fournissant un éclairage sous un cône bien précis correspondant à la pupille de sortie et au champ de vue, conduisant à des moteurs d'affichage plus efficaces.

Guides d'onde optiques

Les systèmes AR récents utilisent de plus en plus les guides d'onde diffractifs comme combineurs de choix, associés aux LCOS ou aux DLP ou aux très attendus panneaux de micro-affichage microLED RVB. Il existe aujourd'hui trois plates-formes de guides d'ondes : les architectures holographiques, à réseau de diffraction et à guide d'onde géométriques réfléchissants en verre ou en plastique. Les combineurs plats de type guides d'ondes sont préférés aux systèmes basés sur des architectures de type « Bird Bath » pour les lunettes intelligentes en raison de leur schéma d'expansion de pupille 2D offrant une grande boîte à œil et un facteur de forme plus compact. Cependant, des moteurs d'affichage à haute luminosité sont nécessaires pour des combineurs de guides d'ondes efficaces, ce qui rend les panneaux micro-OLED adaptés aux architectures à visière de type « Bird Bath » tandis que les panneaux micro-LED semblent mieux adaptés aux combineurs de guides d'ondes. Les combineurs de guides d'ondes holographiques ont été mis en œuvre pour la première fois dans les années 1990, tandis que les combineurs de guides d'ondes à réseaux de diffraction ont été explorés pour diverses applications avant de devenir courants

dans les lunettes intelligentes. Les guides d'ondes géométriques réfléchissants peuvent transporter un champ de vision plus grand que les guides d'ondes diffractifs ou holographiques pour un même indice de réfraction du guide, et les guides d'ondes en verre géométriques réfléchissant de type Lumus offrent une excellente alternative. Plusieurs entreprises développent également des solutions de guides d'ondes réfléchissants en plastique. La pile transparente des systèmes d'affichage AR ajoute des fonctions essentielles telles que la position de l'image virtuelle devant l'utilisateur, l'intégration de verres correcteurs, le système de suivi oculaire et pupillaire, les capteurs d'alignement de l'affichage binoculaire, etc. Le guide d'onde, qui constitue le plus grand espace des lunettes intelligentes, est utilisé pour mettre en œuvre bon nombre de ces fonctions tout en offrant une expérience de transparence inchangée.

Conclusion

Les progrès en matière de guides d'ondes, de micro-LED/OLED et de balayage par faisceau laser piloteront la prochaine génération de systèmes d'affichage, mais nécessiteront une ingénierie optique intelligente associée à la science des matériaux et aux technologies d'intégration pour en exploiter pleinement le potentiel. Et même si le marché grand public des appareils AR/VR/MR a mis du temps à mûrir, principalement en raison du manque d'applications universelles pour favoriser l'adoption par le grand public, les améliorations techniques des technologies d'affichage permettent de résoudre les problèmes liés au confort et à la portabilité. Le développement récent de moteurs d'intelligence artificielle de type « assistant IA » est une des directions privilégiées pour les acteurs majeurs sur le marché des lunettes connectées et de leur cas d'utilisation universelle (Meta, Google, Amazon et Microsoft). ●

Le kit pédagogique LightBox : vers un rapprochement entre physiciens, enseignants et médiateurs autour de projets expérimentaux en optique

Christophe DAUSSY*

Laboratoire de Physique des Lasers, UMR 7538 du CNRS, Université Sorbonne Paris Nord, 99 av. JB Clément, 93430 Villetaneuse, France

* christophe.daussy@univ-paris13.fr



© Atouts Sciences

Les phénomènes optiques, souvent sources d'émerveillement, constituent un terrain d'expérimentation privilégié pour favoriser l'éveil scientifique. La LightBox est une action conçue pour l'enseignement et la diffusion de la culture scientifique afin d'encourager le développement de projets expérimentaux créatifs en optique. Elle vise à rapprocher les acteurs de l'enseignement supérieur, de la recherche et les enseignants, animateurs et médiateurs scientifiques.

<https://doi.org/10.1051/photon/20412727>

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'approche expérimentale occupe une place essentielle dans l'enseignement et la médiation scientifique. Elle est centrale pour appréhender la nature de la connaissance en physique, construite autour du dialogue entre observations (les mesures) et représentations du monde (les théories et les modèles). En classe, l'expérimentation peut être source de motivation et favoriser l'apprentissage des élèves. Lors d'actions grand public, elle peut

aussi susciter la curiosité et favoriser l'interactivité. Cependant certains enseignants, médiateurs ou animateurs éprouvent parfois des difficultés à s'engager dans une telle démarche. Les freins généralement invoqués sont le manque de matériel adapté et le besoin d'accompagnement ou de formation. Les physiciens sont souvent sensibles au rôle qu'ils peuvent jouer dans le partage de la culture scientifique mais n'ont pas toujours la connaissance des besoins qui

peuvent exister sur leur territoire, dans les écoles, les associations ou les structures d'accueil périscolaire. Nous avons conçu la LightBox comme une action visant à rapprocher, autour de projets expérimentaux, les acteurs de l'enseignement, de la médiation, de l'animation et ceux de l'enseignement supérieur et de la recherche. Les premiers trouveront un support matériel, sous la forme d'un kit pédagogique permettant de découvrir les ●●●

étonnantes propriétés de la lumière, ainsi que la possibilité de se former et d'être accompagnés par un référent scientifique. Pour les seconds, la LightBox est une opportunité de s'engager dans une démarche favorisant les interactions entre sciences, recherche et société.

Présentation du projet

Il existe une grande diversité de ressources et de matériel pédagogique pour accompagner la conception d'activités scientifiques expérimentales. Ces produits sont souvent très ciblés en termes d'usages et de

classes d'âges. Ainsi les dispositifs grand public destinés à la promotion de la culture scientifique ne sont généralement pas adaptés à l'enseignement. Les équipements proposés aux professeurs des écoles ne sont pas ceux destinés aux professeurs du second degré. L'action LightBox a été développée dans un souci de polyvalence afin de pouvoir être mobilisée dans des contextes très variés de l'enseignement et de la médiation scientifique. Elle s'appuie sur un kit pédagogique ainsi que sur un dispositif de formation et d'accompagnement assuré par des référents scientifiques.

Le kit a été conçu dans l'esprit des sciences frugales pour être

accessible au plus grand nombre tout en proposant des expériences simples mais efficaces qui peuvent être exploitées aussi bien pour leur caractère ludique ou spectaculaire dans le contexte d'actions de médiation que pour leur intérêt didactique dans le cadre scolaire. Les composants choisis sont robustes et manipulables en toute sécurité par tous. Fourni en un unique exemplaire, le kit est particulièrement adapté pour des démonstrations en petit groupe avec des expériences au plus près du public. Pour une présentation en grand groupe, le matériel doit simplement être complété par des sources lumineuses plus intenses adaptées à ce type d'intervention. Enfin pour un atelier science dans le cadre scolaire ou périscolaire un lot de 5 à 10 kits est mis à disposition afin de permettre un travail par groupes de 3 à 5 enfants.

Le kit est accompagné d'un guide projets qui propose plus de 40 pistes d'expérimentations autour 7 thématiques (figure 2). Chaque thématique est développée sous la forme de fiches pédagogiques et de ressources complémentaires. Les fiches pédagogiques présentent des expériences simples réalisables avec le matériel contenu dans le kit en indiquant les principaux objectifs, le matériel utilisé, les observations attendues ainsi que des éléments d'interprétations et d'ouvertures. Les ressources complémentaires présentent les concepts physiques essentiels associés aux fiches pédagogiques et des exemples pratiques d'ateliers pour concevoir son propre projet.

Le kit pédagogique LightBox ne vise pas l'autonomie de ses utilisateurs face à la diversité des projets scientifiques qu'ils peuvent imaginer. Il doit au contraire être une source d'inspiration et de questionnements à l'origine d'interactions entre le porteur de projet et son référent scientifique qu'il peut solliciter pour être formé ou guidé dans la réalisation et l'interprétation de ses expériences.

CONTENU DU KIT

Sources de lumière : LED, laser et sources de lumière contrôlables par Arduino® (LED rouge, verte, UV, LED RVB, diode laser).

Composants optiques : barreau en PMMA, lentilles, prisme, fibre, miroirs plan et parabolique, filtres, écran, polariseurs, réseau, DVD et hologramme.

Composants pilotables : module Arduino avec plaquette de prototypage et fils de connexion, résistances, diode, cellules solaires, batteries, moteur, détecteurs.

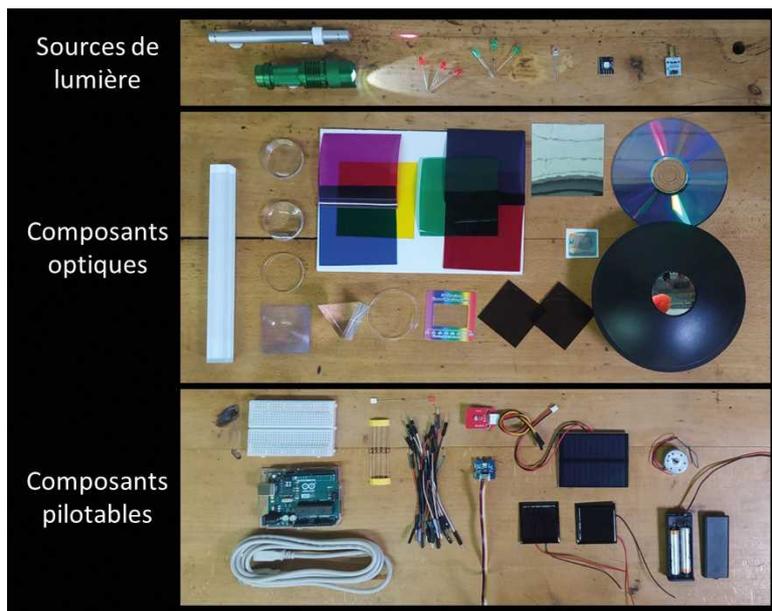


Figure 1. Matériel contenu dans un kit. © Atouts Sciences

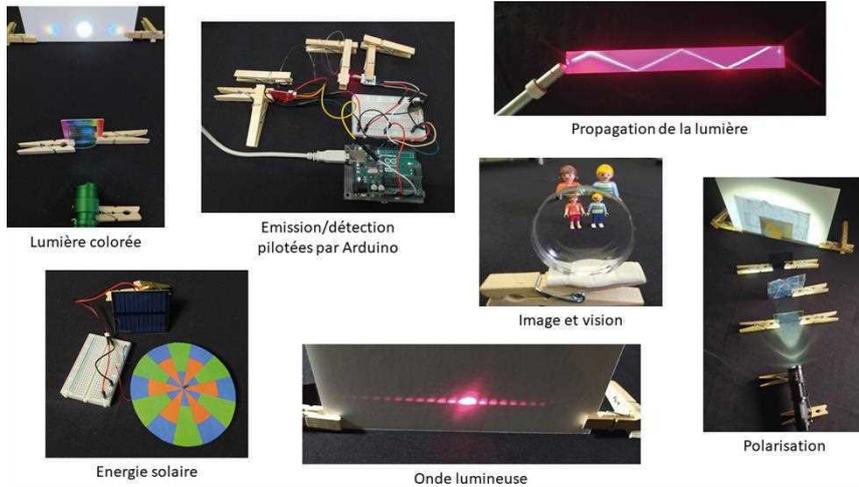


Figure 2. Expériences illustrant les 7 thématiques du guide projets. © Atouts Sciences

Déploiement du projet

L'action LightBox a été conçue par Atouts Sciences [1], association animée par des membres du Laboratoire de Physique des Lasers (Université Sorbonne Paris Nord – CNRS) qui mènent depuis plus de 10 ans des actions en faveur de la diffusion de la culture scientifique dans le nord parisien. La fabrication des kits est centralisée dans les locaux de l'association. La SFO a accompagné le déploiement du projet en portant sa labélisation pour l'Année de la Physique [2] et pour la Journée internationale de la lumière (UNESCO) [3]. Une rubrique dédiée au sein du site web de la SFO a également été créée pour promouvoir cette action [4]. La diffusion des kits est assurée par la commission enseignement de la SFO et par la commission Physique/Optique sans frontières (SFP/SFO) pour les pays d'Afrique et d'Amérique latine.

Le kit est mis gratuitement à disposition pour une année scolaire. Les enfants, les élèves et leurs encadrants sont ensuite libres d'imaginer leur projet pour explorer quelques-unes des propriétés étonnantes de la lumière en favorisant créativité, expérimentation et approche pluridisciplinaire. Les projets conduisent généralement à des productions présentées sous la forme de démonstrations, de

stands, de vidéos, d'exposés ou encore de posters. Les porteurs et référents sont incités à coorganiser une restitution du projet à l'occasion de la Journée Internationale de la Lumière (le 16 mai). En fin d'année scolaire il est demandé au porteur de projet de rédiger un rapport que nous utilisons pour assurer un suivi de l'utilisation des kits. Dans une démarche participative, ces retours d'expériences permettent également de faire évoluer et d'adapter le contenu du kit LightBox. La partie ressources complémentaires du guide est ainsi alimentée chaque année par la communauté des utilisateurs. Le kit a quant à lui été récemment enrichi avec la thématique « énergie solaire ». Dans son rapport, le porteur de projet indique enfin s'il souhaite conserver le matériel pour une année supplémentaire. A défaut, le kit est restitué, reconditionné, puis mis à disposition de nouveaux utilisateurs. Le choix de ce format de prêt s'inscrit dans une démarche de sobriété et de durabilité qui permet d'optimiser le taux d'utilisation des kits.

Dans une phase exploratoire, 200 exemplaires d'une première version du kit pédagogique LightBox ont été produits et diffusés gratuitement au cours de l'année 2015 par l'association Atouts Sciences pour l'Année Internationale de la Lumière (UNESCO). Devant ●●●

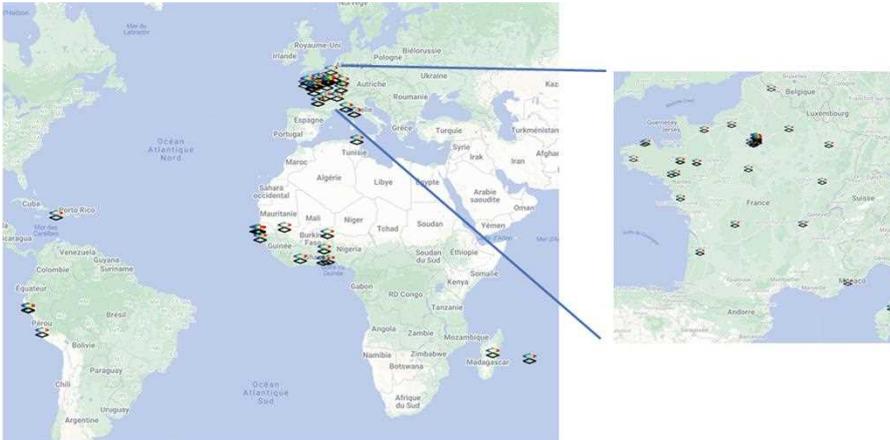
Pôle d'Expertise Photonique :
Précision, Performance,
Innovation



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



www.wavetel.fr
about.wavetel.fr



le succès rencontré, en 2021 la commission enseignement de la SFO a décidé de relancer et de faire évoluer ce projet. Afin de prendre en compte l'évolution des programmes du second degré, le kit a été complété par une partie orientée photonique qui repose sur le pilotage de composants à l'aide d'une carte Arduino. Au cours de cette seconde phase, les modalités actuelles de la mise à disposition (avec accompagnement et suivi

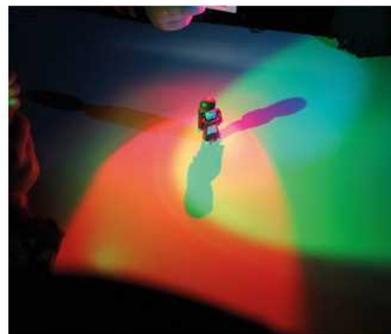
Figure 3. Répartition géographique des projets menés avec le kit LightBox en France et dans le monde. © Atouts Sciences

Figure 4. Exemples d'utilisation du kit LightBox. © Trégor Photonics Student Club, Atouts Sciences, C. Avenoso - Lycée Paul Vincensin, Maison Pour La Science en Bretagne.

annuel des projets) ont été définies. Depuis 2021, le kit a été déployé en France et dans 10 pays en Afrique et en Amérique latine avec 46 kits mis à disposition au cours de l'année scolaire 2021/2022, 135 kits en 2022/2023 et 245 kits en 2023/2024 (figure 3). Ce déploiement a conduit 47 référents scientifiques à accompagner plus de 70 projets dans des contextes très variés (figure 4). Environ 30% des actions relèvent de la diffusion de la culture scientifique sous la forme de stands, de conférences, d'ateliers ou encore des clubs scientifiques associatifs ou dans le cadre de l'accueil périscolaire. Plusieurs musées utilisent le kit LightBox pour l'animation d'ateliers en lien avec leurs expositions. Il est également utilisé dans le cadre scolaire, de la maternelle au lycée (43% des usages) et dans l'enseignement supérieur (17% des usages). Plusieurs travaux pratiques ont été montés en Afrique et en Amérique latine, notamment au Sénégal, en Côte d'Ivoire, au Bénin, au Togo, au Pérou ou encore à Haïti.



Stand pour la fête de la science



Atelier ombres et couleurs en maternelle



TP en Licence 3 au Sénégal



Dispersion de la lumière blanche en classe de seconde



Formation d'enseignants du premier degré

Enfin 10% des actions concernent la formation continue des enseignants du premier et du second degré (avec le réseau des Maisons Pour La Science et l'IREM Paris Nord), la formation de médiateurs, d'animateurs (au sein de musées, d'associations et de structures d'accueil périscolaire) et l'initiation à la médiation scientifique des doctorants et des enseignants-chercheurs.

Conclusion et perspectives

Le développement rapide de l'action LightBox illustre une réelle attente de projets s'inscrivant dans cette démarche d'une « science avec et pour la société ». Nous travaillons actuellement à la structuration en réseau des référents investis dans cette action. Avec l'appui d'enseignants du secondaire et en collaboration avec les rectorats, le réseau des Maisons pour la Science et le réseau Canopé, nous poursuivrons le développement de formations à destination des enseignants du premier et du second degré. Parallèlement nous inciterons plus de référents à proposer des formations à la médiation scientifique au sein de leurs établissements universitaires. Enfin, pour valoriser et donner une large visibilité au travail réalisé sur le terrain par les enfants, les élèves, nous projetons de piloter l'organisation d'un événement annuel de restitution des projets pour célébrer la Journée Internationale de la Lumière.

L'auteur tient à remercier Thierry Chartier, Romain Dubessy et Julien Fade pour leur participation à la réflexion et la conception de certaines expériences ainsi que l'ensemble des porteurs de projets et référents pour leurs rapports annuels qui ont permis la production des ressources complémentaires du guide projets. L'auteur exprime sa plus grande gratitude aux membres de la commission enseignement de la SFO pour leur implication dans la promotion du kit et à François Piuze, président de la commission Physique/Optique sans frontières, pour son action déterminante dans la diffusion du kit en Afrique et en Amérique latine.

Le contenu du kit est principalement financé par le Labex First TF, l'IREM Paris Nord, le Laboratoire de Physique des Lasers, l'Université Sorbonne Paris Nord et le CNRS, le Réseau Optique et Photonique, l'Institute for the Science of Light et la SFO. ●

RÉFÉRENCES

- [1] <https://www.atouts-sciences.org/>
- [2] <https://anneedelaphysique.cnrs.fr/>
- [3] <https://www.unesco.org/fr/days/light>
- [4] <https://www.sfoptique.org/pages/sfo/lightbox.html>



AQ6370E

Analyseur de Spectre Optique

Gamme de longueurs d'onde: 600-1700 nm

AQ6370E est l'un des huit différents modèles d'OSA de Yokogawa

Ces huit modèles couvrent une gamme de longueurs d'onde allant de 350 nm à 5,5 µm. Avec huit modèles de haute précision et performances inégalées, choisissez l'OSA idéal pour votre application. Contactez notre partenaire Wavetel pour plus d'informations.

En coopération avec :

Découvrez-le ici :



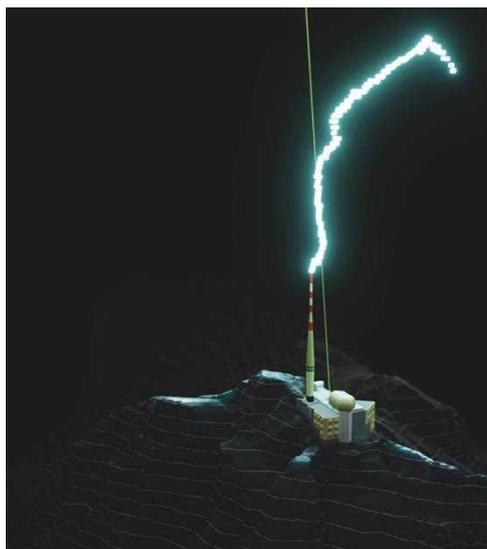
www.wavetel.fr
about@wavetel.fr



Precision Making

www.tmi.yokogawa.com

PROPAGATION D'IMPULSIONS LASER INTENSES DANS L'AIR



André MYSYROWICZ^{1,*}, Jean-Pierre WOLF²

¹ Institut polytechnique de Paris, Laboratoire d'optique appliquée, Palaiseau, France

² Université de Genève/Dept. De Physique Appliquée, Genève, Suisse

*Andre-Edmond.Mysyrowicz@ensta-paris.fr

La propagation d'impulsions laser intenses et très courtes dans l'air donne lieu à des effets spectaculaires. Nous décrivons dans cet article plusieurs expériences réalisées avec le laser teramobile et ses successeurs.

<https://doi.org/10.1051/photon/20412732>

La fin du siècle passé a vu se développer des lasers émettant des impulsions ultra-courtes, ayant une durée dt de quelques femtosecondes ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$). La puissance lumineuse instantanée $P = E/dt$ peut alors devenir importante même si l'énergie E de chaque impulsion reste modeste. Par exemple, une impulsion émise par un laser Ti:Sapphire commercial fonctionnant à une longueur d'onde de 800 nm a typiquement une durée de 50 fs et une énergie de quelques dizaines de mJ, ce qui donne lieu à une puissance crête de l'ordre du térawatt ($1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$). Avec de telles puissances, la propagation de ces impulsions laser dans l'air est complètement modifiée. Au lieu de diminuer au cours de la propagation, l'intensité lumineuse crête des impulsions s'accroît par rétrécissement de la taille du faisceau et reste ensuite élevée sur

des longueurs bien supérieures à la longueur de Rayleigh, comme si les effets de diffraction étaient supprimés [1] (voir encadré filamentation femtoseconde). Cet effet de filamentation a été d'abord vérifié en laboratoire sur quelques mètres. Il est vite apparu qu'il serait intéressant de sortir les lasers femtosecondes de leur laboratoire pour effectuer des expériences sur de plus grandes distances et sur des sites appropriés. Dans le cadre d'une coopération franco-allemande entre quatre équipes situées à Berlin, Jena, Lyon et Palaiseau, un projet soutenu par le CNRS et la DFG (« Teramobile ») a permis une première mondiale, l'utilisation d'un laser femtoseconde mobile de classe térawatt appelé teramobile construit par la société Thalès. Il émet à une cadence de 10 Hz dans le proche IR (800 nm) des impulsions ayant une durée de 70 fs et une énergie par impulsion de 350 mJ. Ce laser a été installé dans un conteneur facilitant

son transport. Quelques années plus tard, un laser de même performances mais dix fois plus léger a été construit par la société Amplitude. Tout récemment, un laser transportable Yb:Yag fonctionnant à une cadence de 1 kHz a été construit par la société Trumpf. Il émet des impulsions de 1 picoseconde (10^{-12} s) de durée à une longueur d'onde de 1.03 μm . L'énergie de chaque impulsion monte à plus de 500 mJ.

DESCRIPTION DE QUELQUES EXPÉRIENCES

Propagation à longue distance et effet LIDAR multi-bande

Dans une première expérience, le laser teramobile a été installé au voisinage d'un télescope situé au sommet d'une montagne en Allemagne, à Tautenburg. Les impulsions laser étaient dirigées vers le ciel. La première figure montre une image de leur propagation observée à l'aide du télescope. On voit que le faisceau

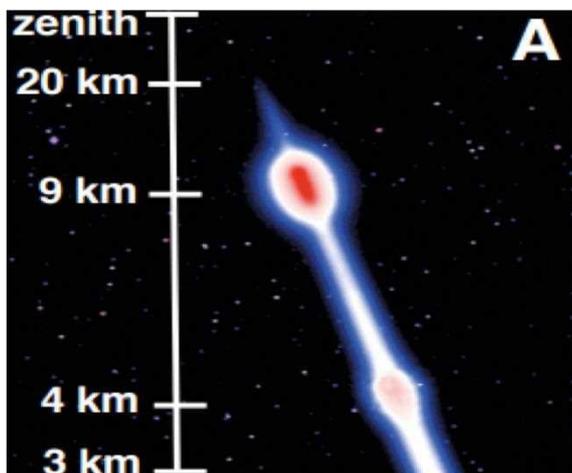
laser se maintient par filamentation sur des distances atteignant 20 km et traverse même deux couches nuageuses fines situées à 5 et 9 km [1]. Des expériences ultérieures en propagation horizontale ont confirmé ces résultats en montrant qu'une ionisation de l'air pouvait se faire sur des colonnes de plus de 100 m de longueur à 1 km du laser.

Au cours de sa propagation dans l'air en régime filamentaire, l'impulsion laser voit son spectre s'élargir et couvrir toute la partie visible du spectre (voir encadré filamentation) Cette lumière blanche rétrodiffusée à partir d'une altitude de 4.5 km a été recueillie par le télescope et son spectre a été analysé. Une multitude de raies a été observée, correspondant principalement à des transitions dans les molécules d'oxygène et de vapeur d'eau, ce qui permet de mesurer à distance la température et la pression de l'air. Le même système a été utilisé pour analyser par LIDAR (Light Detection and Ranging) la présence de polluants atmosphériques [2].

Transfert de puissance électrique dans l'air

La colonne d'air ionisée lors de la filamentation permet de déclencher et de guider des décharges électriques entre deux électrodes chargées. La figure 2 illustre cet effet. Il est instructif de comprendre comment est obtenue cette décharge électrique guidée et le mécanisme qui abaisse son seuil de déclenchement. Lors de l'ionisation de l'air, le laser dépose rapidement de l'énergie ce qui entraîne un réchauffement très rapide de la colonne d'air de 100 μm d'épaisseur créée par filamentation. La géométrie particulière du filament (longue et fine colonne) provoque une évacuation radiale des molécules à des vitesses supersoniques. Une zone de sous-densité centrale est alors formée ●●●

Figure 1. Photo de la propagation d'une impulsion laser dans le ciel prise à travers le télescope de Tautenburg. On remarque la diffusion par deux couches nuageuses situées à 5 et 9 km de hauteur.



OPTIQUES FABRIQUÉES

pour les sciences de la vie
et les dispositifs médicaux



Filtres optiques, lentilles sphériques et asphériques, séparateurs de faisceaux, et bien plus encore : des composants de précision en optique et imagerie fabriqués par Edmund Optics® pour les applications industrielles, medtech et autres.

- **Solutions de fabrication & de traitement personnalisées :** réalisation d'après dessin, conception sur mesure ou modification de pièces en fonction de vos besoins
- **Métrologie** et contrôle des processus de pointe
- **Service d'ingénierie** et de consultation de premier ordre, du prototypage à la production à l'échelle

Pour en savoir plus:

www.
edmundoptics.fr/
manufacturing



+33 (0) 820 207 555
sales@edmundoptics.eu

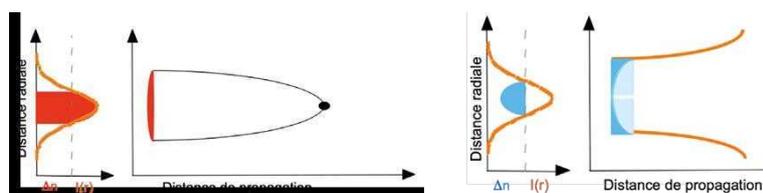
durant plusieurs millisecondes. Cette colonne sous-dense abaisse le seuil de déclenchement de décharges électriques car elle augmente la mobilité des électrons (effet Paschen) et offre

ainsi un parcours privilégié pour une décharge électrique rectiligne. Afin de mesurer quelle puissance électrique on est capable de commuter entre deux électrodes, le laser teramobile

a été installé au centre d'essais des TGV à Ivry sur Seine. Il a été possible de commuter avec peu de pertes et sans contact mécanique des puissances électriques considérables de l'ordre du MW qui correspondent à l'alimentation des TGV [1]. Ceci peut être intéressant pour la conception de trains rapides dans le futur, sachant que leur vitesse devient fortement limitée à grande vitesse par la friction mécanique entre pantographe et ligne à haute tension.

FILAMENTATION LASER FEMTOSECONDE

L'indice de réfraction n_0 d'un milieu transparent est modifié en présence d'une forte intensité lumineuse $I(r,t)$ et s'exprime en première approximation et loin de toute résonance sous la forme $n(r,t) = n_0 + n_2 I(r,t)$. Un faisceau laser ayant un profil radial avec une intensité maximale sur l'axe auto-induit un effet de lentille car le front d'onde s'incurve, comme le montre la figure. Si la puissance du laser dépasse une valeur critique P_{cr} ($P_{cr} = 3.2$ GW dans l'air pour un laser à 800 nm), cet effet de lentille, qui est cumulatif avec la propagation, surpasse l'effet de diffraction qui tend à augmenter la taille du faisceau. Ceci a pour conséquence un effondrement du faisceau sur lui-même au cours de sa progression dans l'air. Cependant, l'effondrement du faisceau est arrêté lorsque l'intensité locale devient telle qu'elle provoque l'ionisation de l'air par ionisation multiphotonique des molécules d'azote et d'oxygène. Le plasma ainsi formé tend à diminuer l'indice du milieu et agit comme une lentille divergente. Il s'en suit une compétition dynamique entre l'auto focalisation par effet Kerr optique et la défocalisation liée à la présence du plasma. Avec une courte durée d'impulsion lumineuse, la densité du plasma créé reste faible par rapport à la densité critique du plasma, ce qui empêche l'effondrement total de l'impulsion, phénomène observé avec des impulsions plus longues. Il s'en suit la formation d'une étroite colonne où l'intensité se maintient à une valeur proche de 10^{14} W/cm² sur des distances considérables, bien supérieures à la distance de Rayleigh, comme si les effets de diffraction étaient annulés. Cette fine colonne lumineuse intense, d'une épaisseur de 100 μ m, est entourée d'un bain de photons qui l'aide à se maintenir en suppléant aux pertes dues à l'ionisation. Il n'existe pas de solutions analytiques pour décrire ce phénomène de filamentation, cela nécessite des simulations complexes, particulièrement en régime de dispersion normal [1]. Un autre effet lié à la filamentation femtoseconde est la création d'une source blanche ultra-brève par élargissement du spectre de l'impulsion. L'augmentation de l'indice de réfraction du milieu au sommet de l'impulsion est plus importante que sur ses bords, ce qui ralentit sa vitesse de propagation par rapport au reste de l'impulsion et entraîne un raidissement de son front arrière. Une variation temporelle rapide de l'indice correspond à un changement rapide de la phase de l'onde et à la création instantanée de nouvelles fréquences optiques. Ces nouvelles fréquences ajoutées sont de plus basses fréquences lorsque l'impulsion augmente en intensité et de plus hautes fréquences lors de sa diminution. Cela entraîne donc un élargissement spectral plus important aux courtes longueurs d'onde à cause du raidissement du front arrière de l'impulsion. Une source blanche de lumière ultra-brève couvrant tout le spectre visible est ainsi créée lors de la propagation du filament à partir d'un laser infrarouge [1].



I Auto focalisation (a) et défocalisation (b): schéma de principe

Amélioration de vol supersonique (diminution de la traînée par filamentation)

On sait qu'un objet se déplaçant dans l'air à une vitesse approchant ou dépassant celle du son voit une augmentation considérable de la résistance à la poussée. Une expérience a été menée pour diminuer cette traînée en exploitant les propriétés de la filamentation. Les impulsions laser sortaient du nez d'une maquette formant des filaments à l'avant de cette maquette, ce qui provoquait une réduction de la densité de l'air le long de l'axe du laser. La maquette était placée dans une soufflerie où l'air avait une vitesse Mach 3. Par convection, la dépression venait s'appliquer sur le nez de la maquette où elle formait une bulle de dépression qui perturbait la couche de contact entre l'air et l'ensemble de la maquette. Une réduction de la traînée estimée à plus de 40% par tir laser pendant plusieurs dizaines de microsecondes a été mesurée avec un laser opérant à une cadence de 10 Hz [3]. Des expériences récentes à 1 kHz avec le laser Trumpf montrent que cet effet évolue bien avec la cadence du laser. Ceci laisse à penser qu'une réduction significative de la poussée moyenne exercée sur un engin pourrait être obtenue avec un laser opérant à une cadence de 10 kHz ou plus.

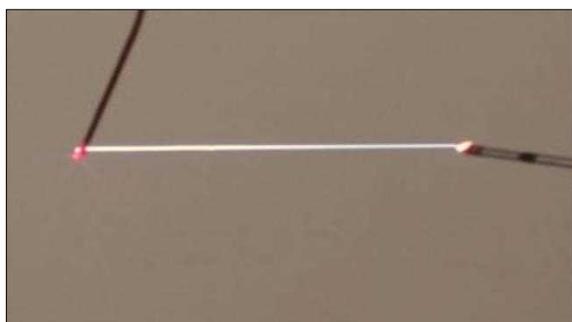
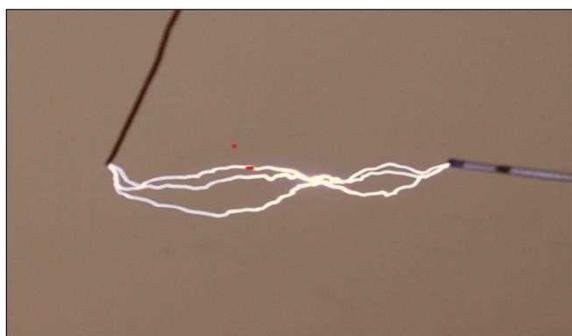
Guidage de la foudre

On a vu que les puissances électriques commutées dans l'air sont importantes et que d'autre part l'ionisation de l'air peut être obtenue

sur plusieurs dizaines de mètres. Il devient alors naturel d'envisager de déclencher et de guider la foudre par filamentation. Une expérience franco-suisse de guidage de la foudre a été effectuée récemment en Suisse. Le laser Trumpf a été installé au sommet du mont Saentis, dans les préalpes appenzelloises. Ce site est équipé d'une tour servant d'antenne de télécommunications de 110 m de hauteur qui est régulièrement foudroyée. Ce site a été instrumenté et utilisé depuis une dizaine d'années par l'EPFL pour observer et mieux comprendre les mécanismes de formation de la foudre. À l'été 2021, dans le cadre du projet européen « laser lightning rod (llr-fet.eu) », la première démonstration du guidage de la foudre par un laser a pu être réalisée [4].

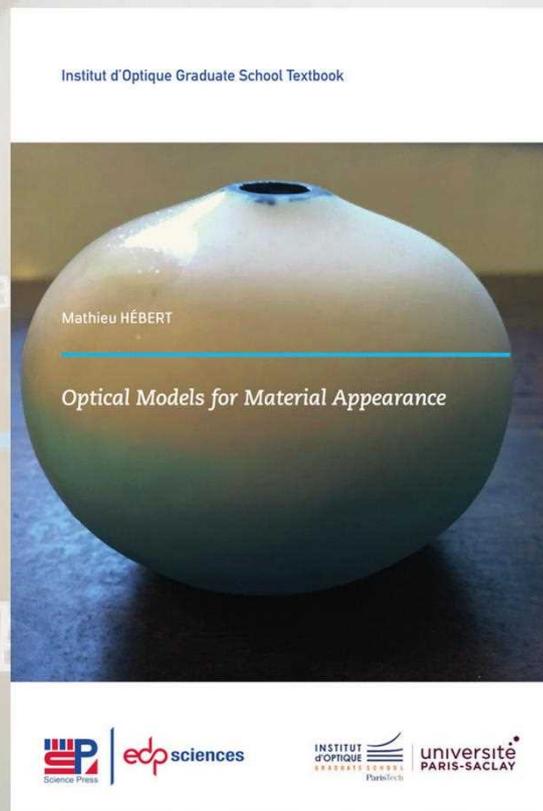
En effet, comme en témoignent les images simultanées de 2 caméras ultrarapides installées sur des montagnes voisines (figure 3), les filaments produits par le laser ont permis de guider des décharges de foudre sur plus de 50 mètres. Ces observations ont été confirmées par d'autres équipements d'observation, comme celles avec un interféromètre radiofréquence. Cette première démonstration en vraie grandeur du contrôle de la foudre par laser ouvre la porte à des applications importantes pour la protection d'infrastructures sensibles de grandes dimensions, comme des centrales électriques ou des aéroports, ce que ne permet pas l'utilisation classique de paratonnerre métalliques (la hauteur du paratonnerre doit être comparable à la dimension de la zone à protéger au sol).

Figure 2. Décharges électriques spontanées et guidées par un filament.



Optical models for material appearance

By
Mathieu Hébert



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

Also available in e-book format
For sale on
laboutique.edpsciences.fr

ISBN : 978-2-7598-2647-6
242 illustrated pages
Price : 95 €



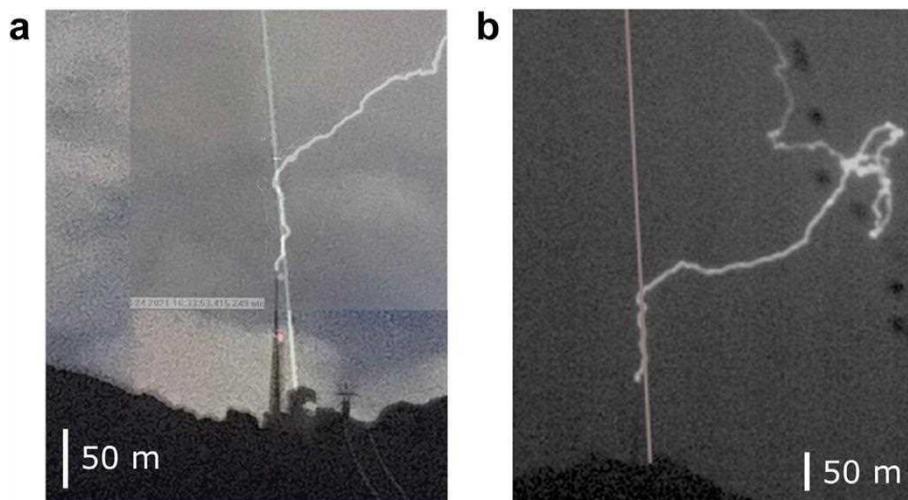


Figure 3. Photo de la foudre guidée par laser prise à une distance de 1.4km (A) et de 5 km (B)

PERSPECTIVES

Guides d'onde optique dans l'air

Il est possible d'exploiter les propriétés des filaments femtosecondes pour créer dans l'air à distance un guide optique transitoire. Plusieurs filaments répartis sur un cercle provoquent un faisceau d'ondes radiales de surpression dont une partie converge vers le centre du cercle, ce qui entraîne (avec retard) une augmentation de sa densité. Cette augmentation centrale de densité remplit les conditions d'un guide d'onde lumineuse transitoire durant plusieurs ms, qui permet de guider une autre impulsion laser plus longue. Il a été ainsi démontré, notamment avec le laser Trumpf que l'émission d'un autre laser pouvait être guidée sur plusieurs dizaines de mètres avec un très bon taux de transmission. La réalisation de tels guides d'ondes optiques ouvre la perspective d'une imagerie optique à distance dans le ciel.

Communications optiques espace libre

Les communications optiques en espace libre, par exemple entre la terre et un satellite, offrent des taux de transfert d'informations entre 100 et 1000 fois plus élevés que les habituelles radiofréquences. Elles ont aussi la réputation d'être plus sûres, car plus directives et mieux cryptées. Cependant, un inconvénient majeur

qui limite actuellement leur déploiement est la présence de brouillard ou de nuages, qui interrompent le transfert. Récemment, il a été montré que l'onde de surpression d'air mentionnée ci-dessus permettait aussi de déplacer les gouttes d'eau présentes dans l'atmosphère, et donc de créer un canal de communication au travers d'un nuage. Si le taux de répétition est supérieur à quelques centaines d'impulsions par seconde, le « trou » dans le nuage est conservé de manière permanente. Il peut alors servir comme canal de transmission pour des lasers télécom. La démonstration en a été faite à l'échelle du laboratoire [5], et des travaux sont en cours pour étendre ces capacités à des situations réelles.

Sources secondaires (ondes THz)

Lors de sa propagation, une impulsion filamentaire est la source d'une large gamme d'émissions secondaires allant

de l'UV jusqu'aux basses fréquences radio. Un aspect particulièrement intéressant est l'émission vers l'avant d'ondes térahertz (longueur d'onde entre 0.01 et 3 mm). Ces ondes offrent des applications intéressantes, notamment pour l'identification de molécules complexes et pour la sécurité car elle permet de 'voir' à travers des parois non conductrices. Cependant, ces ondes se propagent très mal dans l'atmosphère car elles sont fortement atténuées en présence de vapeur d'eau. On a vu qu'il est possible de créer des filaments, sources d'onde THz, à des distances kilométriques, évitant ainsi leur atténuation lors de l'illumination de cibles lointaines. Le rendement de conversion est faible ($\sim 10^{-9}$). Cependant, il a été démontré qu'il est possible de créer un grand nombre N de filaments (avec $N \sim P/P_{cr}$) et de les organiser, en jouant sur la phase ou l'amplitude radiale d'un faisceau laser, selon des structures bien définies telles que des réseaux [1]. Il a été démontré d'autre part que ces ondes THz peuvent interférer entre elles. On peut alors imaginer créer à distance avec un laser femtoseconde de puissance petawatt ($1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$) un réseau de mille filaments. L'intensité devrait alors croître par interférence comme N^2 et la direction de l'émission THz être dirigée, à l'instar des radars à commande de phase, en jouant sur les retards entre les filaments. ●

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient vivement Aurélien Houard et Jérôme Kasparian pour leurs contributions aux travaux décrits dans cet article.

RÉFÉRENCES

- [1] A. Couairon *et al.*, *Physics Reports* **441**, 47 (2007)
- [2] J. Kasparian *et al.*, *Science*, **301**, 1 (2003)
- [3] P. Q. Elias *et al.*, *Science Advances* **4**, 11 (2018)
- [4] A. Houard *et al.*, *Nature Photonics* **17**, 231 (2023)
- [5] G. Schimmel *et al.*, *Optica* **5**, 1338 (2018)

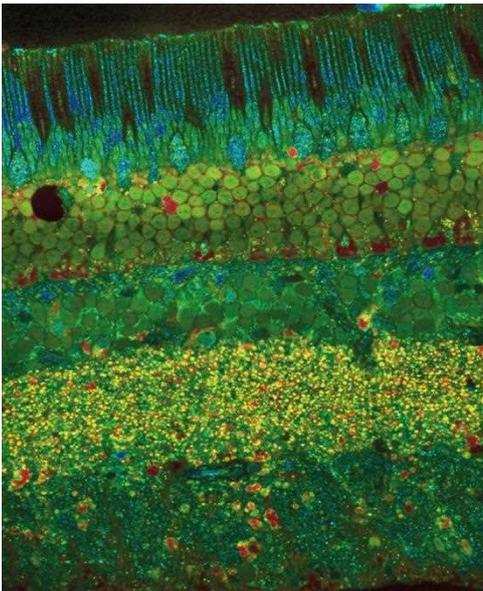
IMAGERIE 3D EN DIRECT : LA TOMOGRAPHIE PAR COHÉRENCE OPTIQUE DYNAMIQUE

Tual MONFORT¹, Salvatore AZZOLLINI¹, Nathaniel NORBERG¹, Olivier THOUVENIN², Kate GRIEVE^{1*}

¹ Sorbonne Université, INSERM, CNRS, Institut de la Vision, 17 rue Moreau, et CHNO des Quinze-Vingts, INSERM-DGOS CIC 1423, 28 rue de Charenton, F-75012 Paris, France.

² Institut Langevin, ESPCI Paris, Université PSL, 1 rue Jussieu, 75005 Paris, France.

*kate.grieve@inserm.fr



Pour accompagner la révolution des cultures cellulaires dérivées de cellules souches pluripotentes humaines, qui permettent la modélisation de maladies, le développement de thérapies et la médecine personnalisée sans recourir à des modèles animaux, les outils d'imagerie adaptés font défaut. La tomographie par cohérence optique plein champ dynamique offre un contraste métabolique pour une imagerie haute résolution non invasive, sans marquage, et en direct dans les cultures 2D et 3D, pour l'étude longitudinale de cellules et d'échantillons humains.

<https://doi.org/10.1051/photon/202412737>

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.

Les progrès récents des techniques de culture cellulaire ont conduit à l'utilisation croissante de cultures cellulaires 2D dérivées de cellules souches, et d'organoides qui sont les structures cellulaires 3D équivalentes et s'approchant de tissus humains cultivés in vitro. Pour quantifier la toxicité et l'efficacité des médicaments sur les organoides dérivés des patients avec une préparation minimale et sans les détruire au cours du processus, les outils d'imagerie

commerciaux font actuellement défaut. La tomographie dynamique par cohérence optique plein champ (DFFOCT), développée par notre groupe à Paris, offre une solution susceptible de répondre aux besoins des communautés de la recherche et de l'industrie pharmaceutique [1].

ORIGINES DE LA SOLUTION TECHNOLOGIQUE

La tomographie par cohérence optique (OCT) est souvent décrite comme l'équivalent optique de l'imagerie échographique, car elle

s'appuie sur la mesure des échos lumineux pour étudier les tissus en couches de manière non invasive [2]. Ces mesures sont réalisées par interférométrie optique puisqu'aucun dispositif électronique n'est capable de résoudre temporellement les échos provenant de structures espacées de seulement quelques microns. Le faisceau provenant d'une source lumineuse à faible cohérence temporelle est divisé en deux parties, une partie allant au bras d'échantillon où il est rétrodiffusé depuis les structures d'échantillon internes situées ●●●

à différentes profondeurs, tandis que l'autre partie est réfléchi par un miroir de référence placé à une distance qui correspond aux temps de propagation des deux faisceaux, afin qu'ils puissent interférer une fois recombines. La quantité de lumière rétrodiffusée dépend des différences dans la distribution de l'indice de réfraction à partir d'un emplacement confiné à l'intérieur de l'échantillon. Grâce à la faible cohérence, l'OCT ne détecte que la lumière rétrodiffusée depuis un plan de cohérence dont la localisation en profondeur est choisie en ajustant la longueur du bras de référence, conduisant à une capacité de sectionnement qui dépend de la bande passante de la source, et est donc découplée de la résolution latérale. La résolution axiale de l'OCT peut donc dépasser la limite théorique de diffraction axiale contraignant les microscopies à grand champ et confocales. Grâce à ces attributs, l'OCT a été largement utilisée depuis son invention, notamment pour le diagnostic médical, où un large champ de vue mais également une imagerie haute résolution sont souhaitables. Jusqu'à présent, l'OCT a principalement été utilisée pour fournir des informations morphologiques basées sur la lumière rétrodiffusée provenant de structures présentant différents indices

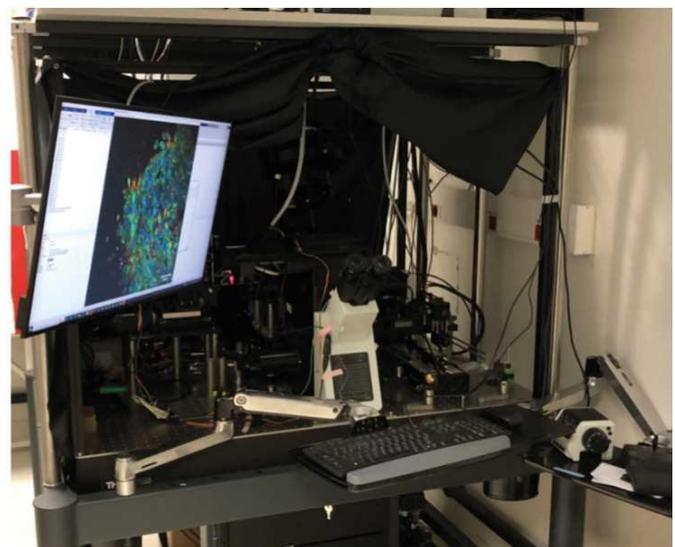
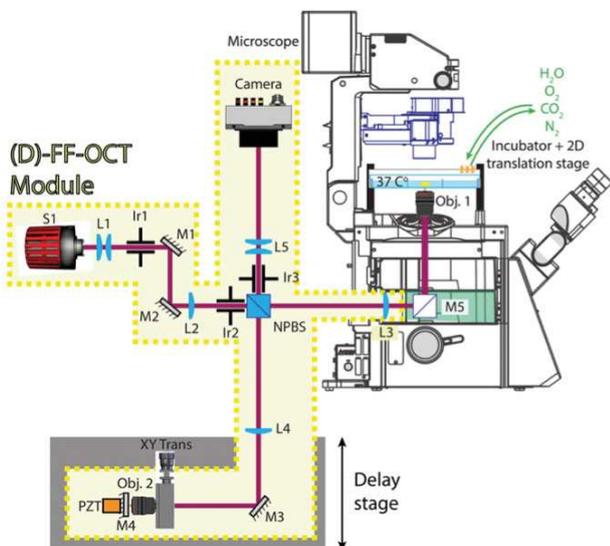
de réfraction à l'intérieur des tissus, comme l'observation des couches rétiniennes ou l'organisation de la matrice extracellulaire. Néanmoins, grâce à sa vitesse d'imagerie et à ses capacités de sensibilité, l'étude des variations temporelles du signal OCT permet de quantifier la façon dont une grande variété de structures biologiques se déplacent, se développent ou se remodelent au fil du temps, ajoutant potentiellement un niveau de caractérisation plus élevé pouvant être utilisé pour augmenter la spécificité de l'OCT.

Tirer parti de ce comportement temporel, à différentes échelles de temps, a permis aux chercheurs d'avoir un aperçu plus approfondi des mécanismes cellulaires et subcellulaires, conduisant progressivement à la mise en place d'une technique d'imagerie fonctionnelle non invasive sans marquage appelée OCT dynamique (D-OCT). [2]. L'idée principale est de collecter le signal provenant de la même zone d'imagerie au fil du temps afin de générer une série de trames qui contiendront l'évolution temporelle du signal d'interférences. Les fluctuations temporelles rapides

(0,1 à 20 Hz) du signal OCT dans les échantillons vivants reposent généralement sur un transport actif à l'intérieur des cellules, nécessitant donc des cellules vivantes produisant et consommant de l'énergie (typiquement sous forme d'ATP) et une organisation fonctionnelle du cytosquelette [2]. Dans certaines cellules, y compris les cellules épithéliales pigmentées de la rétine, il a été démontré que le signal D-OCT provenait principalement du transport mitochondrial [3].

Comme le confirme l'histologie corrélative et/ou la microscopie à fluorescence, le D-OCT permet la visualisation de cellules spécifiques et de leurs noyaux, permettant ainsi l'identification de l'état mitotique des cellules [1], tandis que les fluctuations temporelles peuvent être stimulées par une motilité cellulaire accrue ou des fluctuations membranaires, comme dans les leucocytes, les lymphocytes et les globules rouges, démontrant ainsi le potentiel d'identifier spécifiquement certains types de cellules. En conséquence, grâce à la grande variété de structures qu'il peut identifier, le D-OCT évite le besoin de marqueurs fluorescents, surmontant ainsi les inconvénients liés à la phototoxicité et aux biais introduits par ces outils. Cela permet également de s'affranchir de la plupart des étapes de préparation des échantillons.

Figure 1. Schéma de configuration du D-FFOCT et photographie du microscope à l'Institut de la Vision à Paris.



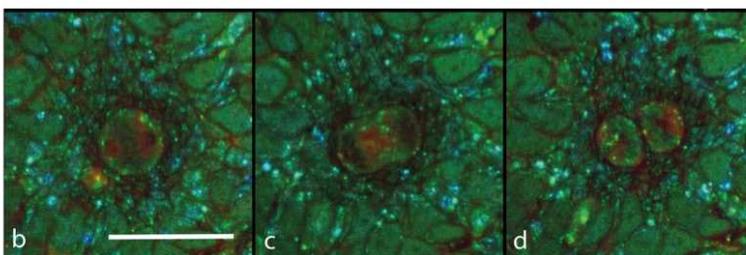
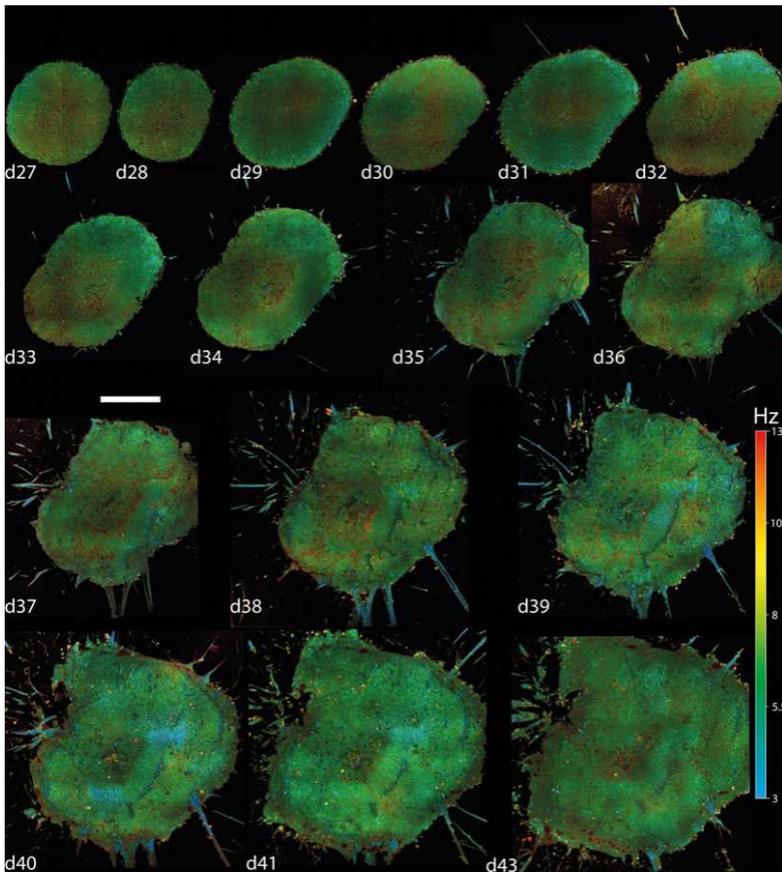


Figure 2. Adapté de [4]. Organoïde suivi pendant 17 jours en culture (barre échelle 50 μ m) et zoom sur un événement de mitose se produisant sur une échelle de temps de quelques minutes (panels temps T0, T0+8 minutes, T0+16 minutes; barre échelle 20 μ m).

Les images d'OCT dynamiques n'utilisent aucun marquage fluorescent. Au lieu de cela, les images couleur sont construites en attribuant une carte de couleurs qui reflète le niveau d'activité intracellulaire, avec des couleurs vives et chaudes indiquant un comportement métabolique distinct, élevé et rapide. Ainsi, les cellules rouge brillant sont très actives avec des mouvements d'organelles rapides à une fréquence particulière, tandis que les cellules bleu terne sont lentes et à large contenu fréquentiel. Les cellules deviennent rouge vif avant un événement de mitose par exemple.



Métrieologie AR/VR

La réalité augmentée et la réalité virtuelle sont souvent basées sur l'utilisation d'écrans miniatures, les NED (Near-Eye Displays).



PUBLI-RÉDACTIONNEL

L'AR-VR touche aujourd'hui un nombre d'applications croissant : la défense, le médical, l'éducation, le divertissement, le tourisme, le sport, l'ingénierie...

Pour répondre au mieux aux différents besoins et garantir la meilleure expérience utilisateur, les fabricants et intégrateurs de NED travaillent à augmenter les performances de leurs produits : la résolution, la netteté, le contraste, les couleurs...



Pour caractériser ces différents paramètres, ainsi que pour répondre aux enjeux liés à la sécurité/santé des utilisateurs (du fait de la proximité de l'œil avec les écrans), Pro-Lite Technology propose des vidéophotomètres et vidéocolorimètres équipés de lentilles spéciales, conçus par Westboro Photonics pour s'adapter aux configurations NED.

Les systèmes de Westboro fournissent des images étalonnées en luminance et couleur. Le logiciel permet leur traitement, afin d'obtenir les valeurs d'uniformité, de contraste, mais aussi de détecter des défauts tels que les pixels morts, pixels brillants, bulles, lignes... ●

CONTACT

Nicolas Marlet,
nicolas.marlet@pro-lite.fr
+33 (0)5 47 48 90 70

TOMOGRAPHIE DYNAMIQUE PAR COHÉRENCE OPTIQUE PLEIN CHAMP: CONFIGURATION OPTIQUE, VISUALISATION D'IMAGES, ET QUANTIFICATION

Nous avons développé une variante de D-OCT appelé OCT plein champ dynamique (D-FFOCT) qui utilise une caméra 2D pour capturer des images plan par plan dans la profondeur de l'échantillon. Un module D-FFOCT a été conçu par l'équipe pouvant s'interfacer avec un microscope conventionnel (Figure 1) afin que les utilisateurs biologistes puissent facilement adopter cette nouvelle modalité d'imagerie et valider leurs résultats par comparaison avec des images de microscopie standard. Les échantillons 3D tels que les organoïdes rétiniens [4] et les échantillons 2D tels que les fibroblastes [5] peuvent être imagés.

Les échantillons sont contenus dans un micro-incubateur (de platine) qui les maintient dans des conditions de culture tout au long de la procédure d'imagerie, ce qui signifie qu'ils peuvent être suivis sur des périodes de quelques secondes, heures, jours, voire mois, sans endommager l'échantillon. L'utilisation d'une faible puissance d'illumination couplée aux longueurs d'onde infrarouges utilisées (810 nm +/- 25 nm) permet de n'observer aucune phototoxicité. Des images en volume à travers la profondeur de l'échantillon peuvent être acquises, ou un plan de profondeur fixe peut être choisi si nous souhaitons suivre la croissance et les modifications de l'échantillon au fil du temps.

Les images d'OCT dynamiques sont calculées dans l'espace colorimétrique Teinte-Saturation-Luminosité (Hue-Saturation-Brightness, HSB). La teinte est calculée avec la fréquence moyenne, du bleu (basses fréquences temporelles) au rouge (hautes fréquences temporelles). La saturation est calculée comme l'inverse de la bande passante de fréquence ; par conséquent, un signal avec une bande passante plus large (par exemple, un bruit blanc) semble terne, alors qu'un

signal avec une bande passante étroite semble vif. La luminosité est calculée comme l'écart type courant.

Les travaux futurs comprennent la quantification des images acquises pour tendre vers des informations spécifiques. Nous travaillons actuellement sur des outils basés sur l'IA pour automatiser la segmentation cellulaire et l'analyse des caractéristiques cellulaires et subcellulaires dans le but d'aider le biologiste à évaluer la morphologie, l'état métabolique, la croissance, la dégénérescence ou l'effet thérapeutique de son échantillon.

APPLICATIONS : IMAGERIE D'ORGANOÏDES RÉTINIENS

Le D-FFOCT a été utilisé dans divers échantillons biologiques, depuis les organoïdes intestinaux jusqu'au poisson zèbre vivant. Ici, nous soulignons l'imagerie des organoïdes rétiniens [1, 4].

La figure 2 montre un organoïde rétinien au cours du développement, suivi pendant 17 jours dans des conditions de culture. Zoomer sur l'ensemble de données permet d'identifier des événements biologiques tels que la mitose, montrée dans la rangée inférieure de la figure 2.

Les organoïdes peuvent être utilisés dans la modélisation de maladies, où les cellules de patients peuvent être cultivées pour reproduire une maladie génétique, par exemple, ce qui peut conduire à la dégénérescence de l'organoïde. L'imagerie en direct avec le D-FFOCT permet donc le

suivi des mêmes organoïdes pendant la croissance et la dégénérescence pour aider à mieux comprendre l'origine de la maladie et à identifier les cibles thérapeutiques. Les effets d'éventuelles thérapies peuvent également être suivis par imagerie, ce qui promet des applications futures en médecine personnalisée.

Les images dynamiques n'utilisent aucun marquage d'OCT fluorescent. Au lieu de cela, les images couleur sont construites en attribuant une carte de couleurs qui reflète le niveau d'activité intracellulaire, avec des couleurs vives et chaudes indiquant un comportement métabolique distinct, élevé et rapide. Ainsi, les cellules rouge brillant sont très actives avec des mouvements d'organelles rapides à une fréquence particulière, tandis que les cellules bleu terne sont lentes. Les cellules deviennent rouge vif avant un événement de mitose par exemple (figure 2).

CONCLUSION

En conclusion, le D-FFOCT est une technique prometteuse d'imagerie en 3D, en direct, et non invasive d'échantillons pouvant être utilisée dans des contextes médicaux. Aucun marqueur fluorescent n'est nécessaire car la carte des couleurs illustre l'activité subcellulaire naturelle de l'échantillon. Nous avons développé une solution modulaire D-FFOCT intégrable dans les microscopes standards. Nous prévoyons son utilisation croissante pour accompagner le marché croissant des organoïdes dérivés de patients. ●

RÉFÉRENCES

- [1] J. Scholler, K. Groux, O. Goureau, *et al.*, *Light Sci. Appl.* **17**, 9:140 (2020)
- [2] S. Azzollini, T. Monfort, O. Thouvenin, K. Grieve, *Biomed. Opt. Express* **14**, 3362 (2023)
- [3] K. Groux, A. Verschuere, C. Nanteau *et al.*, *Commun. Biol.* **5**, 575 (2022)
- [4] T. Monfort, S. Azzollini, J. Brogard *et al.*, *Commun. Biol.* **6**, 992 (2023)
- [5] T. Monfort, S. Azzollini, T. Ben Yacoub, *Biomed. Opt. Express* **14**, 3491 (2023)

TOMOGRAPHIE PAR COHÉRENCE OPTIQUE PLEIN CHAMP POUR L'IMAGERIE IN VIVO DE L'ŒIL HUMAIN

Viacheslav MAZLIN¹, Maxime BERTRAND², Kate GRIEVE^{3,4}, Claude BOCCARA¹, Pedro MECÊ^{1,*}

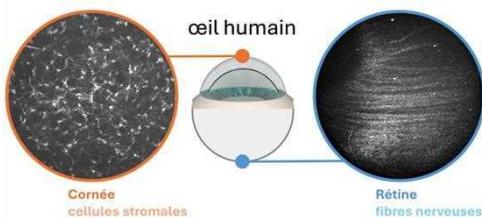
¹ Institut Langevin, ESPCI Paris, Université PSL, CNRS, 1 rue Jussieu, 75005 Paris, France,

² SharpEye SAS, Paris, France,

³ Sorbonne Université, INSERM, CNRS, Institut de la Vision, 17 rue Moreau, F-75012 Paris, France,

⁴ CHNO des Quinze-Vingts, INSERM-DGOS CIC 1423, 28 rue de Charenton, F-75012 Paris, France

*pedro.mece@espci.fr



<https://doi.org/10.1051/photon/202412741>

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.

La Tomographie par Cohérence Optique plein champ (ou OCT plein champ) repose sur l'utilisation d'un interféromètre de Michelson, dans lequel un faisceau lumineux issu d'une source à spectre large est divisé en deux, pour se propager à la fois dans un bras de référence et dans un bras échantillon. La lumière est alors réfléchi, ou rétrodiffusée, par un miroir de référence d'une part, et par l'échantillon d'autre part,

Depuis de nombreuses années, l'OCT plein champ s'est imposée comme une méthode bien adaptée à l'imagerie d'échantillons biologiques ex vivo et in-vitro. Cependant, son utilisation in vivo pour imager la cornée et la rétine de l'œil humain faisait encore face à de nombreux défis. Dans cet article, nous présentons les principales solutions développées par notre groupe au cours des dernières années pour répondre à ces défis. Ces solutions ont permis de transformer l'OCT plein champ en un système clinique capable de fournir, pour la cornée et pour la rétine, des images à haute résolution 3D, à haute cadence d'acquisition et sur un large champ de vision.

puis recombinaison pour générer des interférences capturées par une caméra 2D. En règle générale, l'OCT plein champ utilise une configuration dite de Linnik, dans laquelle deux objectifs de microscope identiques sont placés dans chaque bras de l'interféromètre. L'ouverture numérique des objectifs détermine la résolution latérale (environ 1 μm) de l'OCT plein champ. En revanche, dans les applications à ouverture numérique faible à moyenne telles que l'imagerie oculaire, la résolution

axiale de l'OCT plein champ est définie par la longueur de cohérence, qui est fonction de la largeur spectrale de la source lumineuse. La position de cette porte de cohérence définit l'épaisseur de la zone choisie dans la profondeur de l'échantillon où les interférences ont lieu et correspond à la longueur du chemin optique du bras de référence. Pour générer des images tomographiques, on utilise une modulation de phase pour éliminer le fond incohérent. La façon la plus courante de moduler la

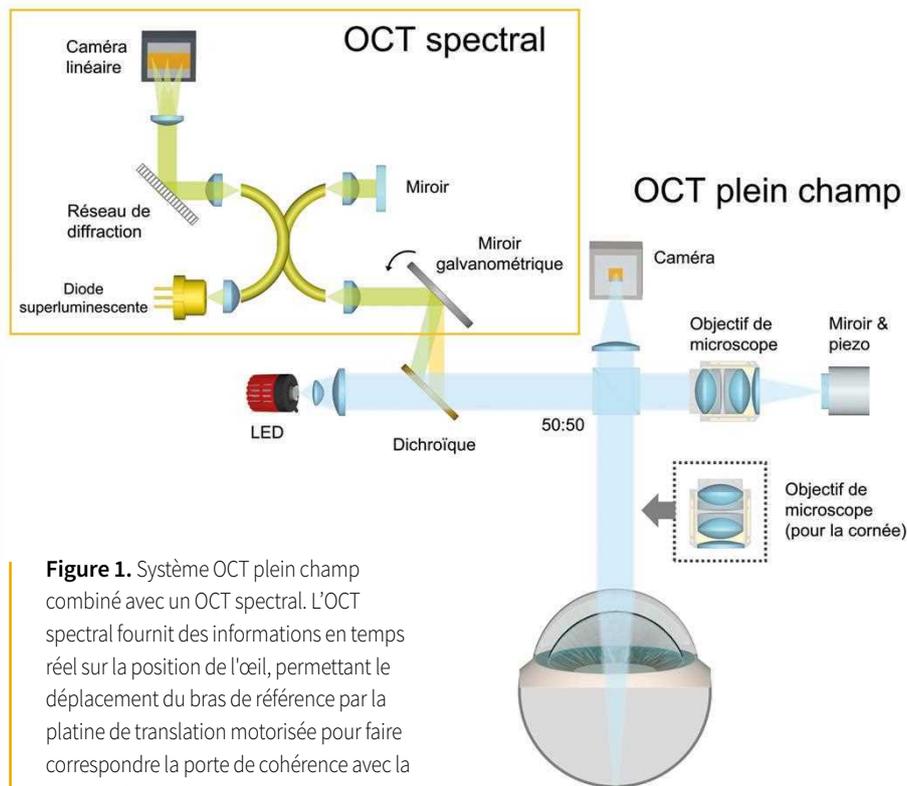


Figure 1. Système OCT plein champ combiné avec un OCT spectral. L'OCT spectral fournit des informations en temps réel sur la position de l'œil, permettant le déplacement du bras de référence par la platine de translation motorisée pour faire correspondre la porte de cohérence avec la couche d'intérêt.

phase consiste à faire varier rapidement la position du miroir de référence, qui est couplé à un transducteur piézoélectrique. Lorsque l'on utilise 3 phases ou plus pour la reconstruction tomographique, on peut séparer les informations d'amplitude et de phase de l'échantillon à une profondeur donnée, définie par la position et la largeur de la porte de cohérence. En raison de la modulation de la phase optique dans le temps, cette méthode est souvent appelée OCT plein champ dans le domaine temporel.

Depuis de nombreuses années, l'OCT plein champ est une méthode reconnue pour l'imagerie d'échantillons biologiques *ex-vivo* et *in-vitro*. Aujourd'hui, la technologie OCT plein champ s'avère particulièrement prometteuse dans le domaine de l'ophtalmologie. En effet, elle permet d'acquérir à grande vitesse des images avec une résolution 3D cellulaire sans avoir besoin d'un schéma de balayage point par point qui ralentit l'acquisition et ajoute

une distorsion induite par le mouvement de l'œil pendant l'acquisition, tel que c'est le cas pour les méthodes de microscopie confocale et d'OCT conventionnelles. Bien que le développement du premier OCT plein champ remonte à 1998, son utilisation en ophtalmologie *in vivo*, et plus précisément pour l'imagerie de la cornée et de la rétine humaines, n'a été rendue possible que très récemment. Ce décalage est le reflet des défis physiques et techniques imposés par l'imagerie *in vivo* avec cette méthode. Dans le cas de l'imagerie de l'œil, les principaux défis sont liés au mouvement de l'œil dans les trois dimensions, à la courbure de la cornée et de la rétine, aux aberrations oculaires, à la faible réflectivité des couches internes de la cornée et de la rétine, et enfin à la puissance lumineuse limitée par les normes de sécurité oculaire. Dans cet article, nous présentons les principales solutions développées par notre groupe au cours des dernières années pour répondre à ces défis.

AMÉLIORATION DE LA SENSIBILITÉ DE L'OCT PLEIN CHAMP

La caméra de l'OCT plein champ capture à la fois 1) les photons balistiques porteurs du signal d'intérêt et 2) les photons multi-diffusés, parasites, ou non focalisés provenant de l'œil et des autres composants optiques du montage. En l'absence de mécanismes de filtrage physique tels qu'un trou d'épingle ou une fente, la majorité des photons détectés sont du second type et peuvent diminuer la sensibilité de l'OCT plein champ. Pour augmenter cette sensibilité, une caméra dédiée a été mise au point. Cette caméra possède une profondeur de puits de 2Me^- , qui est 100 fois supérieure à celle des caméras CMOS conventionnelles, ce qui permet d'atteindre des niveaux de sensibilité de 60 à 80 dB dans l'œil. En outre, elle offre une vitesse d'acquisition élevée de 550 images par seconde à pleine résolution (1440×1440 pixels), ce qui permet de capturer des images tomographiques sur un large champ de vision en seulement 2 à 4 millisecondes, minimisant ainsi l'influence des mouvements de l'œil.

Dans la pratique, pour améliorer la sensibilité du système, une telle caméra doit fonctionner dans un régime proche de la saturation, nécessitant un nombre beaucoup plus important de photons, ce qui augmente potentiellement le risque de surexposition lumineuse de l'œil. Pour pallier ce problème et respecter les normes de sécurité oculaire, il est possible de répartir la puissance lumineuse dans le temps (illumination pulsée) et dans l'espace (densité de puissance répartie sur un champ de vision de l'ordre du millimètre carré).

Cette solution a permis d'acquérir les premières images de la cornée humaine *in vivo* en 2018 [1], révélant des cellules épithéliales superficielles, des nerfs sous-basaux, la membrane de Bowman, des noyaux de cellules kératocytaires, la membrane de Descemet ainsi que des cellules endothéliales. Dans des travaux plus récents, l'OCT plein champ a été utilisée pour

observer la région limbique de l'œil et a permis de visualiser les palissades de Vogt, les réseaux vasculaires, ainsi que les pores du réseau trabéculaire, connus pour jouer un rôle crucial dans la maladie du glaucome. Grâce à sa vitesse d'imagerie élevée, l'OCT plein champ a aussi permis d'étudier quantitativement des processus dynamiques du segment antérieur de l'œil, tels que l'évolution du film lacrymal, le mouvement des cellules érythrocytaires ainsi que les flux sanguins érythrocytaires et lymphatiques.

CORRECTION DES MOUVEMENTS AXIAUX DE L'ŒIL EN TEMPS RÉEL

Le rythme cardiaque et la respiration sont connus pour être responsables d'un mouvement naturel de l'œil d'avant en arrière. Cette composante axiale est non négligeable de par son amplitude (~ 100 μm sur plusieurs secondes) et sa vitesse (vitesse médiane de ~ 1 mm/seconde). Elle ajoute ainsi un défi important au positionnement de la porte de cohérence à la profondeur d'intérêt [2]. Pour résoudre ce problème, l'OCT plein champ a été combiné à un OCT spectral conventionnel à balayage ponctuel, qui produit des images en coupe, permettant de suivre la position axiale de l'œil. En connaissant la position de l'œil, on peut directement déduire le décalage de chemin optique dans l'interféromètre qui doit être corrigé. La figure 1 montre le schéma d'un système OCT plein champ combiné à l'OCT spectral pour l'imagerie de la cornée. Pour l'imagerie rétinienne, la seule différence est que l'objectif de microscope du bras échantillon est remplacé par les optiques de l'œil elles-mêmes.

Grâce à cette combinaison d'instruments, les premières images de la rétine par OCT plein champ ont été obtenues en 2018 [3] et ont rapidement été améliorées de manière significative avec la mise en place d'une boucle de correction du chemin optique en temps réel à l'aide d'une platine de translation motorisée [4]. Pour l'imagerie de la

cornée, une solution similaire a été implémentée mais a nécessité une compensation supplémentaire de la focalisation. En effet, dans ce cas, la présence de l'interface air-échantillon introduit un décalage entre la porte de cohérence et le plan focal.

Le système combiné OCT plein champ/OCT spectral a ouvert la voie à une série de nouvelles avancées et de publications récentes du groupe, portant notamment sur le suivi et la correction des mouvements axiaux de l'œil et sur l'amélioration du signal, par exemple : 1) la prédiction des mouvements par filtre de Kalman et réseau de neurones pour diminuer l'erreur temporelle de la boucle de correction, 2) l'adaptation de la fréquence de modulation de la phase optique à la fréquence naturelle des mouvements axiaux de l'œil (par exemple, liée au rythme cardiaque), 3) l'entraînement d'un réseau Unet d'apprentissage profond pour reconstruire l'image tomographique à partir d'une seule image

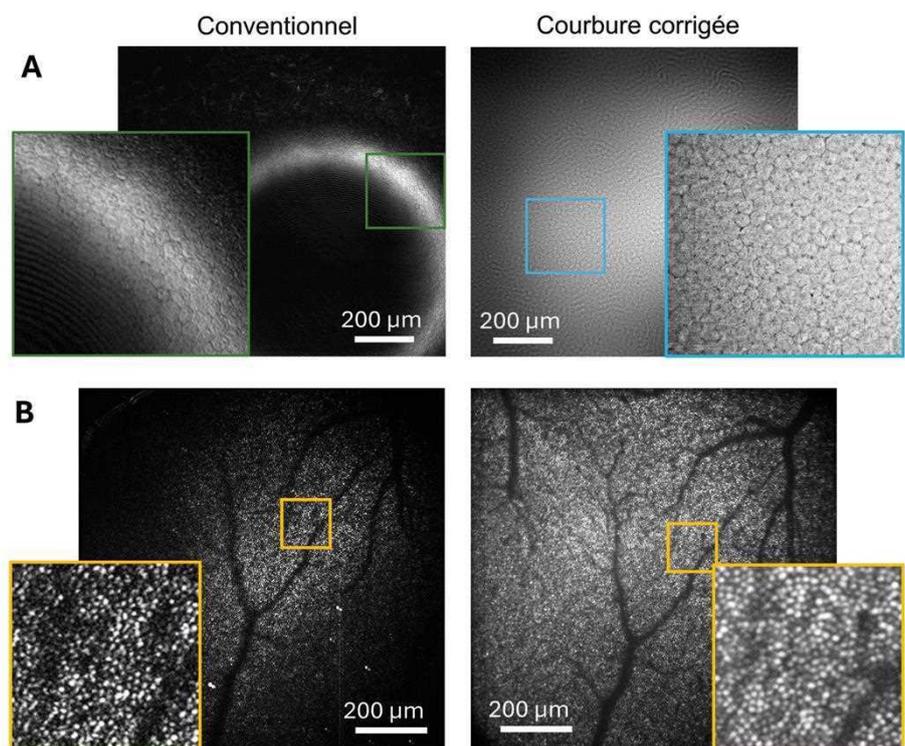
[5], 4) l'utilisation d'une méthode d'apprentissage profond Noise2Noise pour le débruitage des images.

MISE EN FORME DE LA PORTE DE COHÉRENCE POUR UN CHAMP DE VISION ÉTENDU

L'OCT plein champ acquiert des coupes tomographiques avec un champ de vision relativement large, potentiellement 25 fois supérieur à l'état de l'art en matière d'imagerie oculaire à résolution cellulaire et à très haute vitesse. Cependant, la cornée et la rétine étant courbées, le champ de vision utile est réduit car les photons rétrodiffusés par une couche d'intérêt peuvent présenter une différence de chemin optique trop importante par rapport aux photons réfléchis par le miroir de référence, qui est lui plat.

Pour surmonter ce problème, une solution simple a consisté à remplacer le miroir de référence plat par un miroir courbe, dont la ●●●

Figure 2. Comparaison de l'OCT plein champ conventionnel et de l'OCT plein champ avec correction de la courbure pour la cornée (A) et la rétine (B). Les images de (A) sont adaptées de [5] avec l'autorisation de l'Optical Society of America.



courbure est similaire à celle de la cornée, ce qui a permis d'obtenir un champ de vision de $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ [6] (Figure 2 A). Le nouveau dispositif ressemble à un interféromètre de Twyman-Green classique, mais avec une capacité de sectionnement optique supplémentaire. Dans la rétine, le champ de vision utile a été étendu à $1,5 \text{ mm} \times 1,5 \text{ mm}$ (Figure 2 B). Cependant, dans ce cas, le miroir de référence est resté plat. En effet, la courbure de la rétine étant plus faible que celle de la cornée, il a suffi d'insérer une simple lamelle de verre dans le bras échantillon pour la compenser et ainsi faire correspondre les longueurs de chemin optique pour tout point du champ de vision.

Grâce à cette extension du champ de vision, il a été possible d'accéder à plus de détails dans une seule image, comme les cellules endothéliales/sous-basales de la cornée ou les nerfs/photorécepteurs de la rétine. Un grand champ de vision est un précieux atout clinique, car cela améliore la précision et réduit le temps nécessaire pour quantifier des biomarqueurs tels que la densité cellulaire.

MAÎTRISE DES ABERRATIONS OCULAIRES

Une des propriétés les plus remarquables de l'OCT plein champ est la grande robustesse de sa résolution latérale en présence d'aberrations symétriques, telles que le défocus et l'astigmatisme, deux aberrations oculaires dominantes (Figure 3) problématiques pour l'imagerie de la rétine [7,8]. Plus précisément, ce phénomène intéressant est dû à l'utilisation d'une lumière spatialement incohérente qui, en interférométrie, agit comme un trou confocal virtuel [8].

Il convient de noter que si les aberrations symétriques de bas ordre n'affectent que très peu la résolution, elles provoquent néanmoins une baisse du rapport signal sur bruit (RSB), puisque les photons aberrés n'interfèrent pas. Un faible RSB affecte considérablement la robustesse de l'imagerie par l'OCT plein champ, car il est alors nécessaire de moyenner un nombre trop important d'images pour retrouver un contraste satisfaisant. Par conséquent, les couches rétinienne dont la réflectivité est plus faible que celle des photorécepteurs

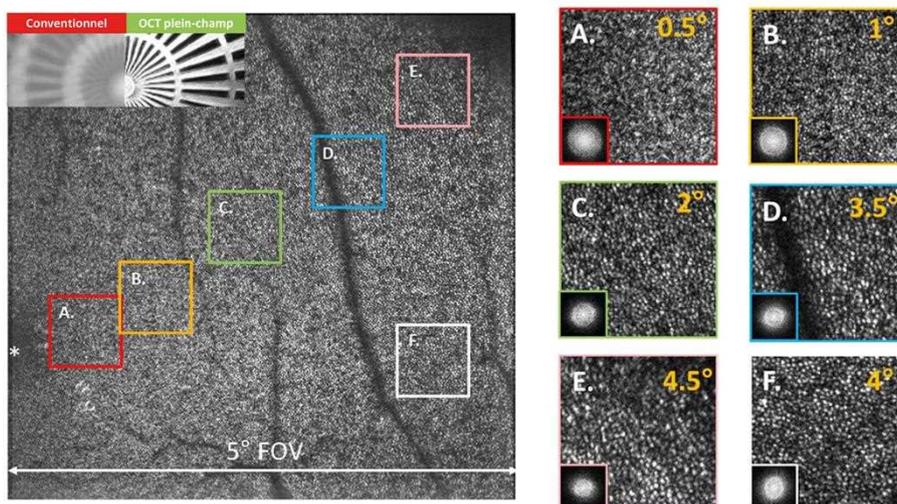
deviennent difficiles à visualiser. Au fil des ans, une série d'approches a permis d'améliorer progressivement le RSB. Initialement, il était demandé au sujet de porter ses propres lunettes de prescription. Ensuite, une méthode appelée « lunettes adaptatives » a été mise au point. Il s'agissait de placer une lentille adaptative juste devant l'œil pour une correction plus précise [9]. Pour piloter la lentille, une approche sensorless a été adoptée, en maximisant la luminosité d'une couche rétinienne d'intérêt donnée par l'image en coupe générée par l'OCT spectral. Enfin, depuis peu, c'est une approche « Woofer-Tweeter » qui est utilisée. Deux composants optiques complémentaires visent à corriger les aberrations : une lentille liquide à focalisation variable pour le défocus, avec une grande amplitude (correcteur woofer), et une lentille adaptative pour les aberrations de plus faible amplitude et d'ordre élevé, telles que l'astigmatisme et la coma.

Ces innovations en matière de correction des aberrations oculaires ont permis d'obtenir une imagerie rétinienne à haute résolution (résolution xyz de $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$) sur un champ de vision de $5^\circ \times 5^\circ$ et sans anisoplanétisme apparent (Figure 3). L'appareil peut résoudre les cônes jusqu'à $0,5^\circ$ du centre de la fovéa, où ils sont très densément regroupés. La couche de fibres nerveuses (NFL) a pu être imagée à différentes excentricités/profondeurs, mettant en évidence des structures rétinienne telles que des fibres de collagène, des Gunn's dots, des faisceaux de fibres nerveuses, des capillaires, des globules rouges ou encore des parois de vaisseaux.

PREMIÈRES ÉTUDES CLINIQUES ET PERSPECTIVES

À ce jour, la méthode OCT plein champ fait l'objet d'études cliniques à l'Hôpital National des Quinze-Vingts à Paris. Dans le domaine de la cornée, les résultats les plus notables ont été observés chez des patients atteints de kératocône et de dystrophie endothéliale de Fuchs. Chez un patient

Figure 3. L'encadré en haut à gauche met en évidence la robustesse de la résolution latérale de l'OCT plein champ à la défocalisation par rapport à un système d'imagerie conventionnel. Image OCT plein champ de la couche correspondant à la jonction entre les segments interne et externe (IS/OS) des photorécepteurs de la rétine. L'astérisque marque le centre de la fovéa. Les zones agrandies de l'image mettent en évidence la haute résolution obtenue, et ce uniformément sur tout le champ de vision (pas d'anisoplanétisme visible)



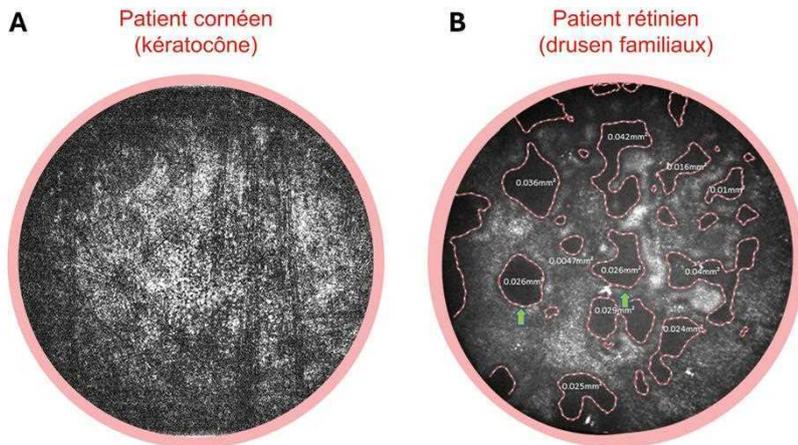


Figure 4. Images cliniques typiques de l'OCT plein champ acquises sur des patients. (A) Image acquise sur un patient avec un kératocône cornéen visible sous forme de bandes sombres (appelées stries). (B) Image acquise sur un patient avec drusen familiaux, zones qui se caractérisent par une absence de signal au niveau de l'épithélium pigmentaire, en raison de sa dégénérescence. Grâce à la haute résolution 3D de l'OCT plein champ, il est possible de quantifier l'étendue de ces drusen et de suivre leur évolution dans le temps avec précision.

atteint de kératocône, l'OCT plein champ a révélé des stries stromales étendues associées à une déformation de la cornée (Figure 4 A). Chez un patient atteint de la dystrophie endothéliale de Fuchs, les fameuses « gouttes » cornéennes ont été observées. L'OCT plein champ permet de visualiser toutes les couches de la cornée avec une résolution cellulaire, à l'instar du microscope confocal, très utilisé en clinique. En revanche, à la différence de ce dernier, l'OCT plein champ ne nécessite aucun contact avec l'œil, et offre par ailleurs une zone de visualisation dix fois plus grande. De nombreux patients atteints de maladies rétinienne ont également été imagés. Chez un patient présentant des drusen familiaux par exemple, il a été possible de les localiser en 3D et de quantifier avec une précision remarquable ces aires de dégénérescence de l'épithélium pigmentaire rétinien (Figure 4 B). La haute résolution 3D de l'OCT plein champ semble donc très prometteuse pour assister les médecins ophtalmologues, par exemple dans le diagnostic précoce de maladies ou encore dans le suivi de leur évolution en réponse à des traitements.

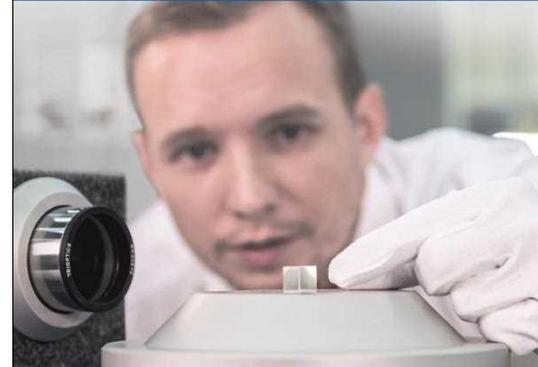
Les essais cliniques en cours sont susceptibles d'élargir la gamme des maladies identifiables par l'OCT plein champ.

La précision des biomarqueurs quantitatifs devrait augmenter avec le nombre d'individus sains et de patients examinés. Comme dans d'autres domaines de l'imagerie, on s'attend également à ce que les progrès rapides des algorithmes d'apprentissage profond contribuent considérablement à améliorer à la fois le traitement et l'analyse des images. ●

RÉFÉRENCES

- [1] V. Mazlin *et al.*, *Biomed. Opt. Express* **9**, 557 (2018)
- [2] Y. Cai *et al.*, *Front. Med.* **9**, 868217 (2022)
- [3] P. Xiao *et al.*, *Optica* **5**, 409 (2018)
- [4] P. Mecê *et al.*, *Biomed. Opt. Express* **11**, 492 (2020)
- [5] V. Mazlin, *Biomed. Opt. Express* **15**, 222 (2024)
- [6] V. Mazlin *et al.*, *Optica* **7**, 872 (2020).
- [7] P. Xiao, *et al.*, *Opt. Lett.* **41**, 3920 (2016)
- [8] V. Barolle *et al.*, *Opt. Express* **29**, 22044 (2021)
- [9] J. Scholler *et al.*, *Opt. Lett.* **45**, 5901 (2020)

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

MESURE DE LA TRANSPARENCE CORNÉENNE PAR L'ANALYSE D'IMAGES OCT

Karsten PLAMANN^{1,2,*}, Maëlle VILBERT^{1,3}, Romain BOCHEUX^{1,2,3}, Cristina GEORGEON⁴, Vincent BORDERIE⁴, Pascal PERNOT⁵, Kristina IRSCH^{3,4}

¹ Laboratoire d'Optique et Biosciences (LOB) / École Polytechnique, CNRS, INSERM, IPP, Palaiseau, France

² LOA / ENSTA Paris, École polytechnique, CNRS, IPP, Palaiseau, France

³ Institut de la Vision / CNRS, INSERM, Sorbonne Université, Paris, France

⁴ IGRC 32, Transplantation et Thérapies Innovantes de la Cornée / Sorbonne Université, Centre Hospitalier National des Quinze-Vingts, Paris, France

⁵ Institut de Chimie Physique (ICP) / CNRS, Université de Paris-Saclay, Orsay, France

*karsten.plamann@polytechnique.edu



I Analyse de la cornée par lampe à fente

La cornée est la première des deux lentilles de l'œil. La transparence de la cornée saine est due à sa structure très régulière qui peut être perturbée en présence de pathologies. Pour diagnostiquer la transparence cornéenne, nous avons développé des méthodes basées sur l'analyse d'images obtenues par tomographie par cohérence optique (OCT) qui permettent d'obtenir des valeurs physiques comme le libre parcours moyen des photons et le pourcentage de transmission cohérente de la lumière, qui impactent la vision.

<https://doi.org/10.1051/photon/202412746>

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.

La cornée est la première des deux lentilles de l'œil et responsable de $\frac{2}{3}$ de son pouvoir optique. Faisant partie des tissus conjonctifs, son stroma – la couche occupant environ 90 % de son épaisseur – est constitué de fibrilles de collagène d'environ 30 nanomètres d'épaisseur, organisées en lamelles avec des épaisseurs entre

1,5 et 3 μm (Figure 1). La transparence de la cornée est étroitement liée à la microstructure régulière des lamelles et à la nanostructure des fibrilles de collagène qui sont immergées dans une substance de base optiquement homogène [1], [2], [3]. La transparence cornéenne peut être compromise par diverses pathologies, infections, réactions immunitaires, traumatismes, vieillissement

et chirurgie, qui entraînent une diffusion accrue de la lumière. Plus de 10 millions de personnes dans le monde souffrent d'un handicap visuel sévère dû à la perte de transparence de la cornée.

Les moyens d'évaluer la transparence cornéenne sont limités. Dans la pratique clinique actuelle, l'évaluation de la transparence cornéenne implique généralement

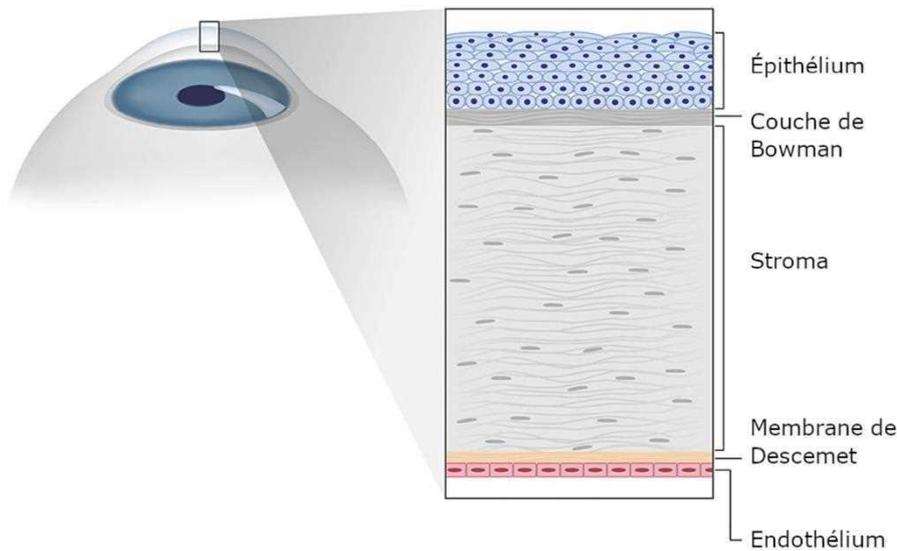


Figure 1. Structure de la cornée. La cornée est constituée de cinq couches qui, de l'avant vers l'arrière, sont l'épithélium, la couche de Bowman, le stroma, la membrane de Descemet et l'endothélium. Le stroma occupe environ 90% de l'épaisseur de la cornée. Il est constitué de fibrilles de collagène immergées dans un liquide qui sont organisées dans des lamelles (www.visis.fr/cornee/, www.dreamstime.com).

une observation des opacités à l'aide d'un biomicroscope à lampe à fente, parfois avec comparaison avec une échelle de gradation arbitraire et subjective. Étant donnée la nature qualitative de l'examen, les résultats dépendent également de l'observateur, sont difficiles à normaliser et manquent de reproductibilité.

Nous avons mis en place une méthode de traitement d'images de tomographie par cohérence optique (OCT = *Optical Coherence Tomography*) que nous avons d'abord validée sur des données enregistrées *in vitro* sur un dispositif à haute résolution [4]. Dans un deuxième temps, nous avons transféré cette approche aux images obtenues *in vivo* sur un dispositif clinique standard [5].

MESURE DE LA TRANSPARENCE CORNÉENNE

Pour notre étude de cornées *in vitro*, des images ont été acquises à l'aide d'un dispositif d'OCT à haute résolution en plein champ (FF-OCT = *Full Field Optical Coherence Tomography*; dispositif « Light-CT », fourni par LLTech, Paris, France). Les images FF-OCT ont été prétraitées par une segmentation des images 3D et

l'aplatissement de la surface cornéenne.

Pour le transfert de la méthode au diagnostic clinique, des images 2D ont été enregistrées sur un dispositif d'OCT en domaine spectral (SD-OCT = *Spectral Domain OCT*) clinique standard (modèle « RTVue-XR Avanti OCT »; Optovue Inc., Fremont, CA, États-Unis). Le prétraitement comprend la suppression d'artéfacts liés au dispositif et à l'enregistrement *in vivo*, à savoir une occasionnelle réflexion spéculaire éblouissant le détecteur sur certaines zones et une surbrillance des régions postérieures de la cornée qui a été corrigée par une analyse par composantes principales (ACP ou anglais PCA = *Principal Component Analysis*) après aplatissement numérique et normalisation de l'image de la cornée.

Notre algorithme d'analyse des images (dont le diagramme de flux est montré sur la figure 3) est basé sur une analyse mathématique des données optiques acquises en fonction de la profondeur de la cornée. Puisque l'application visée est la détection précoce de la perte de transparence, le processus de la diffusion « simple » sera dominant, et il peut être montré que la moyenne des ●●●



MU-DM

ELECTRO-MAGNETIC DEFORMABLE MIRROR FOR :

Microscopy

Ophthalmology

Laser processing

Astronomy

Quantum



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

imagine  **optic**

 **mu-Imagine**
a division of **imagine**  **optic**

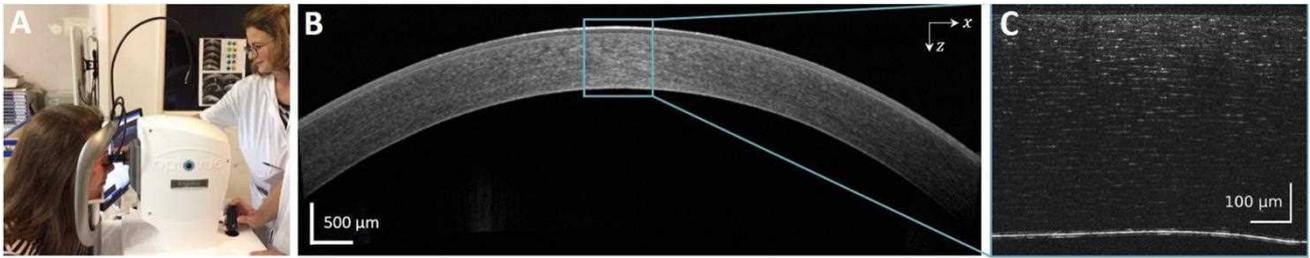


Figure 2. (A) Dispositif de diagnostic de SD-OCT à l'Hôpital National d'Ophtalmologie des Quinze-Vingts, Paris. (B) Image SD-OCT enregistrée *in vivo*. (C) Image FF-OCT enregistrée *in vivo* avec indication de la zone équivalente sur l'image (B).

« photons balistiques » ou, plus précisément, la moyenne cohérente de la lumière est atténuée dans le volume par des processus de diffusion suivant une loi de Lambert-Beer. Le signal FF-OCT en profondeur peut donc s'écrire comme suit :

$$A(z) = A_0 e^{-Bz} + C, \quad (1)$$

avec la coordonnée en profondeur z , un facteur d'amplitude A_0 , une constante d'atténuation B et une constante additive C indicative de la ligne de base ou du fond des photons ayant subi une diffusion multiple. Le libre parcours moyen de photons $\ell_s = 1/B$ est un indicateur de l'ampleur de la diffusion de la lumière. Par ailleurs, tout écart significatif par rapport à une telle décroissance exponentielle devrait indiquer la présence d'une pathologie dont la gravité peut être estimée par la qualité globale de l'ajustement. Pour apprécier l'adéquation d'un modèle mono-exponentiel à l'atténuation du signal OCT en profondeur, nous procédons en trois étapes :

1. Estimation de la composante de bruit aléatoire qui est souvent hétérogène en fonction de z ;
2. Ajustement des paramètres du modèle d'atténuation mono-exponentielle (Éq. 1) par une méthode de moindres carrés pondérés et comparaison des résidus d'ajustement au bruit aléatoire,
3. En cas d'adéquation du modèle, extraction du libre parcours moyen ℓ_s .

Les détails de l'implémentation de l'algorithme et des liens vers le code en ligne peuvent être trouvés dans [4]. Pour l'estimation du bruit aléatoire, une fonction de lissage du type spline

cubique est ajustée aux données. Le rapport signal à bruit est calculé en fonction des résidus par rapport à l'ajustement de la fonction de lissage. Les paramètres de la décroissance mono-exponentielle (Éq. 1) sont estimés par inférence bayésienne. La qualité de l'ajustement mono-exponentiel est exprimée sous forme du rapport de Birge b ; si b est de l'ordre de l'unité et inférieur à un seuil choisi, le modèle de décroissance mono-exponentielle est considéré comme une représentation adéquate des données et nous procédons à l'extraction des paramètres d'ajustement, y compris le libre parcours moyen ℓ_s .

Dans le cas contraire, ce premier modèle n'est pas adéquat et nous procédons à un ajustement par une fonction modifiée. On estime alors les paramètres d'un modèle étendu de décroissance, qui permet de faire varier le libre parcours moyen de diffusion avec la profondeur stromale selon la fonction :

$$A(z) = A_0 e^{-z\ell_s(1 + \Delta\ell_s)} + C, \quad (2)$$

où $\Delta\ell_s$ représente la variation relative autour de la valeur moyenne de ℓ_s . Cette variation $\Delta\ell_s$ n'a pas de forme fonctionnelle pré-établie : elle est traitée de manière non-paramétrique et ajustée par inférence bayésienne avec une contrainte d'amplitude minimale *a priori*.

RÉSULTATS

Évaluation d'images obtenues *in vitro* : Les échantillons chirurgicaux

de cornées pathologiques ont été prélevés dans la salle d'opération de l'hôpital ophtalmologique national des Quinze-Vingts au moment d'interventions de kératoplastie (greffe de cornée). Les échantillons de cornées normales ont été prélevés dans la banque de tissus de l'Établissement Français du Sang après avoir été écartés du circuit de greffe à cause d'un faible nombre de cellules endothéliales. Les principes éthiques et la réglementation en vigueur pour l'utilisation de tissus humains ont été respectés (voir [4] et [5] pour les détails).

La partie droite de la figure 2 montre une coupe transversale d'un bloc d'images 3D FF-OCT, obtenue sur une cornée avec une transparence *a priori* conservée. Comme attendu dans tout milieu diffusant homogène, le signal diminue exponentiellement avec la profondeur stromale. Dans le cas de cornées pathologiques, la présence de cicatrices stromales donne lieu à des régions de rétrodiffusion accrue (souvent appelées « éléments hyper-réfléctifs »). Si ces cornées montrent un rapport de Birge élevé, elles ne sont pas considérées homogènes. Si au contraire elles ne nécessitent qu'une faible correction dans le modèle étendu ($\Delta\ell_s < 0,1$), on peut considérer l'écart comme secondaire et le stroma comme homogène. Des exemples de résultats pour des cas normaux et pathologiques représentatifs (Fig. 3A et 3B) confirment la transparence compromise, avec une

valeur de libre parcours moyen plus faible (B_r , $\ell_s = 69 \mu\text{m}$ vs. A, $\ell_s = 108 \mu\text{m}$) dans la cornée pathologique.

Évaluation d'images de diagnostic clinique enregistrées in vivo : Pour établir une base de données représentative, nous avons étudié un échantillon de $n = 83$ cornées normales. Nous avons privilégié l'analyse des deux modes de prise d'image

« Line » ($n = 45$) et « Cross » ($n = 38$) qui montrent le meilleur rapport signal à bruit. Pour toutes les cornées, les valeurs du rapport de Birge restent assez proches de l'unité ($B_r < 10$). Par conséquent, chaque cornée normale incluse dans notre étude est considérée comme homogène et peut être utilisée pour établir un ensemble de données représentatif des valeurs

de transparence normales par le calcul de ℓ_s .

Nous obtenons une distribution log-normale des valeurs de libre parcours moyen de photons avec un intervalle interdécile (IDR, écart entre le 10^{ème} et le 90^{ème} centile) : 270–2400 μm pour l'ensemble du jeu de données ($n = 83$). L'épaisseur cornéenne dans l'ensemble de notre

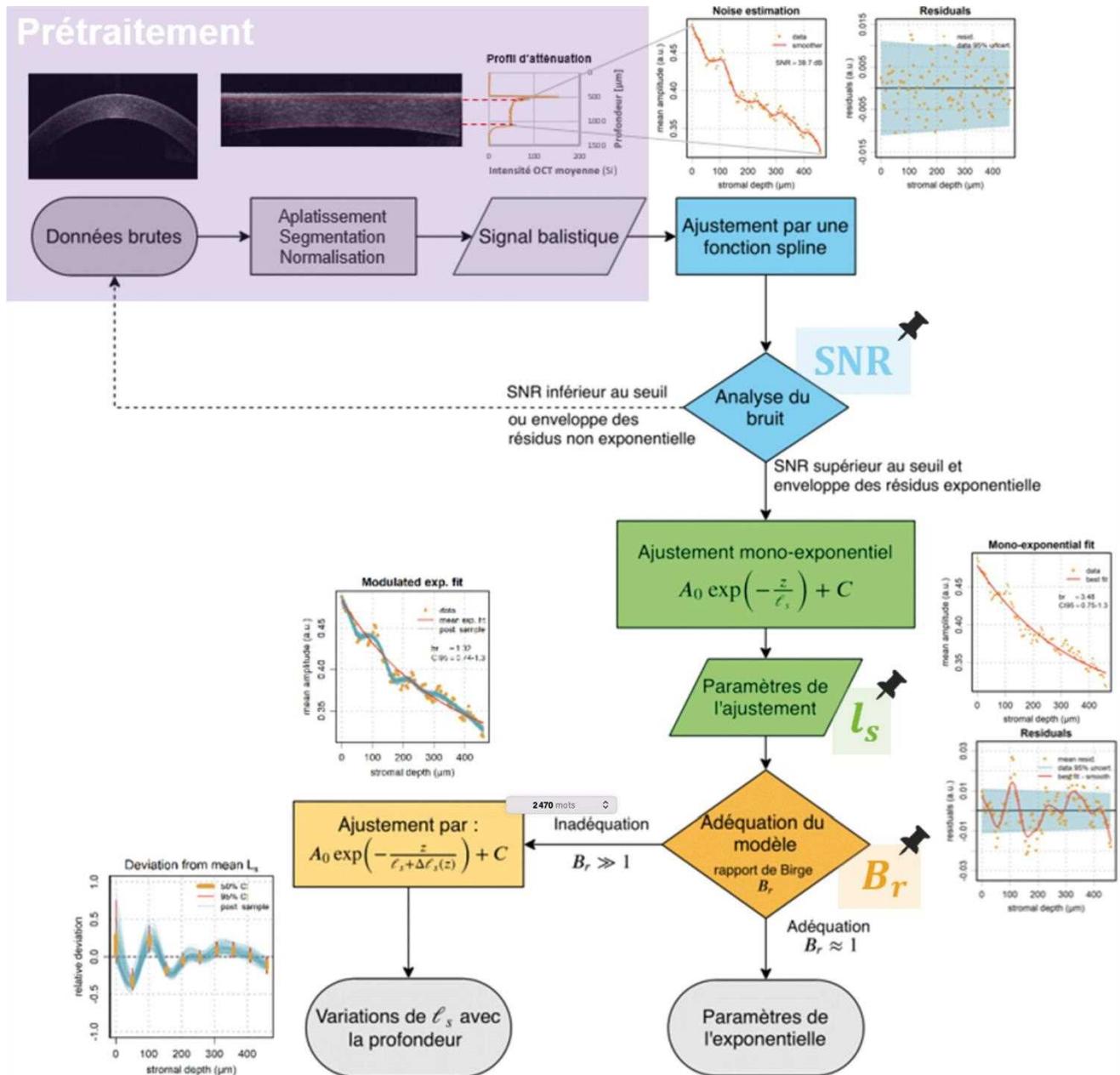


Figure 3. Diagramme de flux de la méthode d'extraction de quantificateurs de la transparence à partir d'images OCT. Les paramètres objectifs permettant l'évaluation de la transparence cornéenne sont « épinglés » là où ils apparaissent dans la chaîne de traitement des données.

groupe varie de à et le pourcentage de la profondeur stromale analysée (c'est-à-dire la ROI stromale en profondeur) correspond en moyenne à 74 % de l'épaisseur cornéenne totale. Combinés avec l'épaisseur analysée, nos résultats de mesures de transparence, exprimés en termes de transmission cohérente et donc en impact sur l'acuité visuelle, donnent une médiane de $T_{coh} = 51\%$ et un IDR : 22-83 %. Nous n'observons aucune corrélation significative entre la transmittance cohérente et l'âge ou l'épaisseur cornéenne.

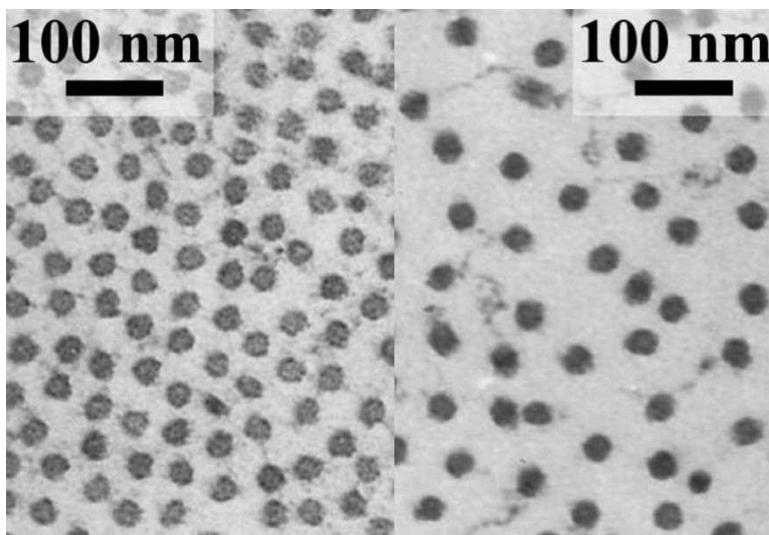
En excluant les images avec artefact de saturation centrale, nous obtenons une médiane de ℓ_s à 1250 μm (IDR : 400 μm - 2500 μm) et T à 73% (IDR : 34% - 84%). En fait,

nous avons observé un impact de l'élimination des artefacts de saturation sur les paramètres de transparence cornéenne mesurés, dans la mesure où des artefacts saturés plus larges étaient associés à une T plus faible (test de corrélation de rang de Spearman : $\rho = -0,44$, $p = 10^{-5}$). Cet impact est significatif pour les coupes centrales de plus de 300 μm . Par conséquent, les images présentant des artefacts de saturation centraux supérieurs à cette largeur ne doivent pas être utilisées pour l'analyse quantitative de la transparence. Par ailleurs, deux cornées normales d'une même personne ont 99 % de chances d'avoir la même épaisseur et 55 % plus de chances d'avoir des mesures de transparence similaires

que si elles sont prises au hasard (ANOVA). De même, il n'y a pas de différence significative entre l'œil gauche et l'œil droit.

Ayant établi un référentiel pour les cornées « normales », nous pouvons étudier des cornées montrant une pathologie cornéenne ou ayant subi une intervention chirurgicale. La figure 4 montre le suivi temporel d'une patiente ou d'un patient ayant développé un *haze* cornéen (une opacification cornéenne) léger après une opération de chirurgie réfractive par PKR (PhotoKératectomie à visée Réfractive, une intervention par laser à la surface de la cornée). La partie (A) montre l'évolution de la probabilité de classification « saine » des images OCT, établie par apprentissage automatique (*One-class Support Vector Machine*). (B-D) Images OCT cliniques respectivement associées aux contrôles en préopératoire (B), au premier mois après l'opération (C) et au neuvième mois après l'opération (D). Nous observons la chute de la transparence directement après l'intervention et son rétablissement graduel pendant les mois suivants.

Le stroma cornéen est constitué de fibrilles de collagène immergées dans une matrice extracellulaire. Du fait de la distribution des charges locales, elles exercent des forces répulsives entre elles. Sous la pression exercée par l'endothélium (la membrane postérieure de la cornée), elles adoptent une structure quasi-régulière qui rend le tissu transparent (voir la partie gauche de la figure). En cas de déficience de l'endothélium, la cornée développe un œdème (excès de liquide dans un tissu) : la structure du tissu devient alors irrégulière et la transparence est compromise (partie droite de la figure). Les images ont été obtenues par microscopie électronique en transmission.



CONCLUSION

Nous avons décrit une méthode basée sur l'analyse optique de données cornéennes qui permet d'extraire objectivement des mesures quantitatives de la transparence cornéenne à partir d'images résolues en profondeur acquises *in vitro*, répondant ainsi à un besoin de santé publique. Le calcul de l'atténuation de la lumière (c'est-à-dire de l'atténuation de la moyenne cohérente) dans le stroma permet de caractériser et de standardiser l'état de transparence de la cornée. Les tissus cornéens hétérogènes et anormaux s'écartaient significativement du profil mono-exponentiel de l'atténuation de la lumière dans la cornée. Une mesure de la déviation du profil mono-exponentiel permet d'estimer la sévérité de

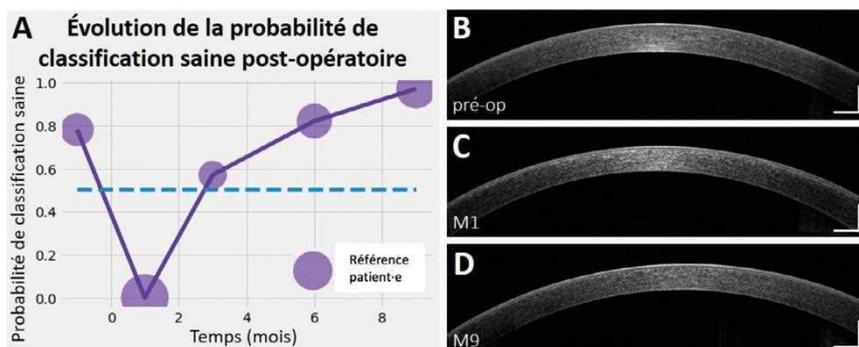


Figure 4. Suivi temporel d'un-e patient-e ayant développé un haze cornéen léger après une opération de chirurgie réfractive par PKR. (A) Évolution de la probabilité de classification saine des images OCT. (B-D) Images OCT cliniques respectivement associées aux visites du/de la patient-e en pré-opératoire (B), au premier mois après l'opération (C) et au neuvième mois après l'opération (D). Barres d'échelle : 500 μ m.

l'hétérogénéité stromale et peut ainsi être utilisée pour différencier les tissus hétérogènes des tissus homogènes. Dans le cas d'un stroma homogène, l'extraction du libre parcours moyen des photons ou encore la fraction de la lumière cohérente transmise permet de quantifier le degré de transparence de la cornée.

Nous avons étendu cette approche aux images obtenues via un dispositif clinique d'OCT en développant un algorithme de prétraitement standardisé qui élimine les artefacts courants liés à l'instrument et aux conditions de l'enregistrement *in vivo*. Nous avons pu établir un référentiel en effectuant des mesures sur $n = 30$ cornées normales sans artefact central : nous avons obtenu une valeur médiane de $\ell_s = 1250 \mu$ m et un intervalle interdécile de 400–2500 μ m pour le libre parcours moyen de photons ainsi qu'un pourcentage

de transmission cohérente de et une IDR de 34–84 %. Notre méthode permet également le suivi des patientes ou patients individuels après une affection oculaire ou une intervention chirurgicale. ●

REMERCIEMENTS

Nous remercions les organismes suivants pour leur soutien financier : European Union's Horizon 2020 research and innovation programme (Marie Skłodowska-Curie grant agreement No. 709104), La Fondation de l'Avenir pour la recherche médicale LabEx PALM (ANR-10-LABX-0039-PALM), European Research Council (ERC) under the European Union's Horizon 2020 research and innovation program (Synergy grant agreement no. 610110, Banque Française des Yeux" (Prix BFY 2019), ANR (programme « Investissements d'Avenir », IHU FOReSIGHT, ANR-18-IAHU-0001).

RÉFÉRENCES

- [1] D. M. Maurice, *J. Physiol.* **136**, 263286 (1957)
- [2] K. Plamann *et al.*, *J. Opt.* **12**, 084002 (2010)
- [3] K. M. Meek and C. Knupp, *Prog. Retin. Eye Res.* **49**, 116 (2015)
- [4] R. Bocheux *et al.*, *PLOS ONE* **14**, e0221707 (2019)
- [5] M. Vilbert *et al.*, *PLOS ONE* **18**, e0291613 (2023)

ARDOP
INDUSTRIE



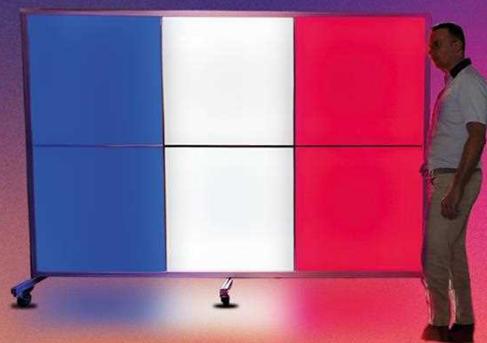
SÉCURITÉ LASER



**SPECTROMETRE
COMPACT**

ARDOP
LIGHTING

SALLE DE LUMIÈRE LED



ardop.com

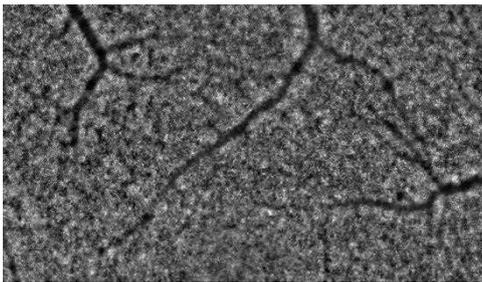
sales@ardop.com

L'OPTIQUE ADAPTATIVE EN OPHTALMOLOGIE : D'UNE IMAGERIE DE LA RÉTINE À UN OUTIL DE PILOTAGE DE LA SANTÉ

Samuel BUCOURT*, Xavier LEVECO

Imagine Eyes – 18 rue Charles de Gaulle – 91400 Orsay

*sbucourt@imagine-eyes.com



L'optique adaptative (OA) s'est silencieusement imposée dans de nombreux domaines depuis 20 ans. Une preuve parmi d'autres : 4 prix Nobel de Physique dans les 10 dernières années ont un système d'optique adaptative au cœur de leur recherche : en microscopie, en astrophysique, dans les lasers ultraintenses et plus récemment pour les applications attosecondes.

<https://doi.org/10.1051/photon/202412752>

Les applications sont encore plus larges : on retrouve des systèmes d'OA dans les communications sol/satellites, sur certaines lignes de lumière synchrotron ou encore dans la fabrication de semiconducteur... Mais c'est bel et bien en ophtalmologie, plus précisément dans l'imagerie de la rétine, qu'on retrouve des systèmes d'OA extrêmement efficaces, automatiques et déjà utilisés par des non spécialistes.

L'OPTIQUE ADAPTATIVE DANS L'ŒIL : PRINCIPES ET DIFFICULTÉS

Un système d'optique adaptative est principalement composé de 3 éléments. Un analyseur de front d'onde

qui mesure les distorsions subies par la lumière lors de la traversée du système optique de l'œil, un miroir déformable qui corrige les distorsions mesurées par l'analyseur de front d'onde et un calculateur qui transforme les mesures de l'analyseur de front d'onde en commandes à envoyer au miroir déformable (cf. figure ci-dessous).

L'analyseur de front d'onde est un analyseur de type Shack-Hartmann. Cette technologie est de plus en plus utilisée en métrologie optique et en optique adaptative. Il s'agit d'une matrice de microlentilles placée devant un détecteur : la position de la tache focale au foyer de chacune des microlentilles permet de remonter à la pente locale du front d'onde. Le

front d'onde est calculé en intégrant l'ensemble de ces pentes locales.

Le miroir déformable est constitué d'une membrane réfléchissante, fine et déformable sur laquelle sont attachés plusieurs dizaines d'actionneurs électromagnétiques miniatures (< 1,5 mm de diamètre) qui permettent de déformer localement la surface du miroir. Chaque actionneur est constitué d'un aimant accroché à la membrane en face duquel se trouve une bobine miniature. En fonction du sens et de l'intensité du courant qui la traverse, l'aimant est attiré ou repoussé par la force magnétique induisant ainsi une déformation locale contrôlée de la membrane.

Grâce à l'amélioration de la puissance de calcul informatique ces

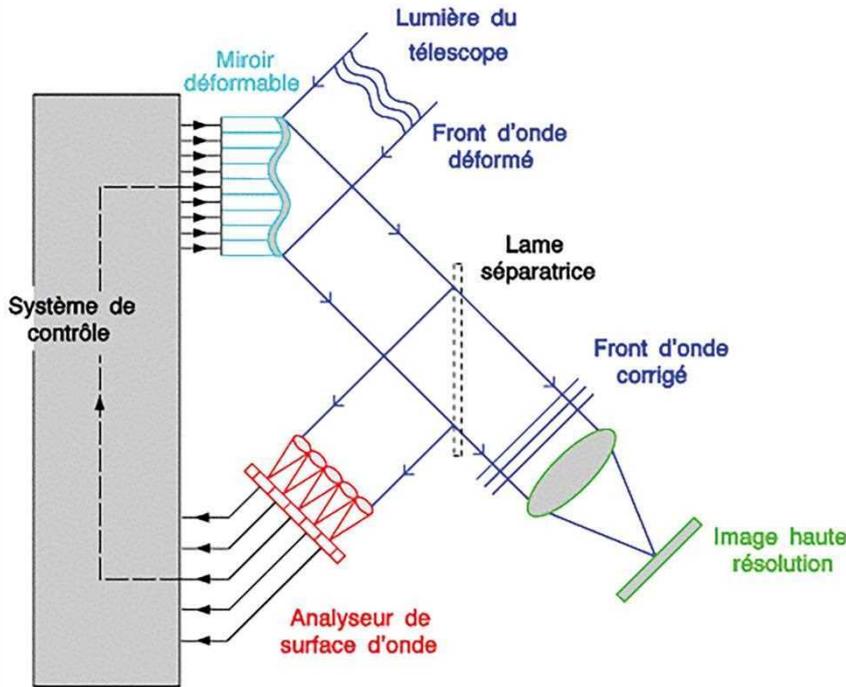


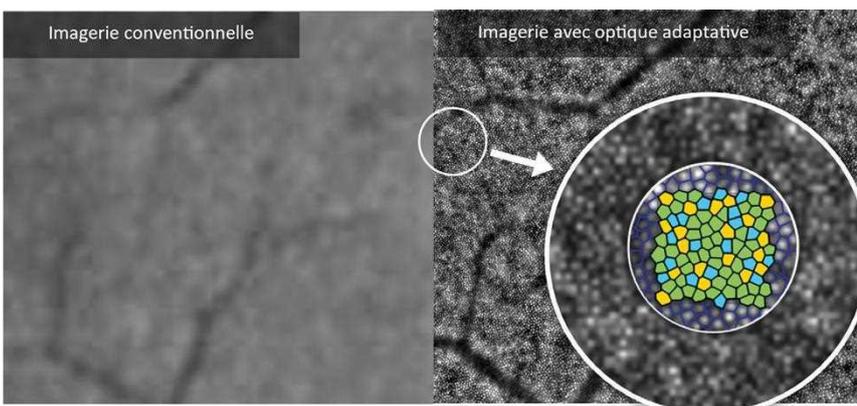
Figure 1. Principe de l'optique adaptative – source : Observatoire de Paris/LESIA

dernières décennies, il est maintenant possible d'utiliser un simple ordinateur comme calculateur d'une boucle d'optique adaptative dite « temps réel » (i.e. fonctionnant à plusieurs dizaines de boucles corrections par secondes).

L'architecture décrite est idéale pour la correction des aberrations de l'œil, mais de nombreuses difficultés sont à prendre en compte avant de pouvoir mettre au point puis commercialiser une telle machine : la première d'entre elles, c'est les réflexions parasites. En effet, le

rapport entre le flux envoyé dans l'œil et le flux utile récupéré est de 1/10000 environ. De ce fait, la moindre réflexion parasite, même avec des traitements anti-reflets très performants à moins de 0,5 %, induit un signal parasite largement supérieur au signal utile. La compacité recherchée pour le système nous impose de travailler avec un système à lentilles (et pas à miroir comme le fond souvent les scientifiques dans leur setups expérimentaux). La solution optique n'est pas simple et nous avons mis de ●●●

Figure 2. L'optique adaptative révèle des détails invisibles en imagerie conventionnelle : à gauche une image de fond de l'œil classique (résolution typique 20-25 μm ; à droite une image réalisée par une caméra fond de l'œil à optique adaptative : on observe des microstructures, ici les photorécepteurs, qu'il est possible de segmenter (image traitée au centre) et compter.



Ultra-cold Atoms, Ions, Molecules and Quantum Technologies

By **Robin Kaiser, Michèle Leduc, Hélène Perrin** Preface By **Alain Aspect**

Current Natural Sciences

QUANTUM INFORMATION

Robin KAISER, Michèle LEDUC and Hélène PERRIN, eds

Ultra-Cold Atoms, Ions, Molecules and Quantum Technologies

Preface by Alain Aspect

edp sciences

The field of cold atoms was born fourty years ago and today remains a theme regularly awarded Nobel Prizes and at the forefront of physics research. This book presents the most recent developments and traces the exceptional growth of this field over the last years.

Also available in e-book format

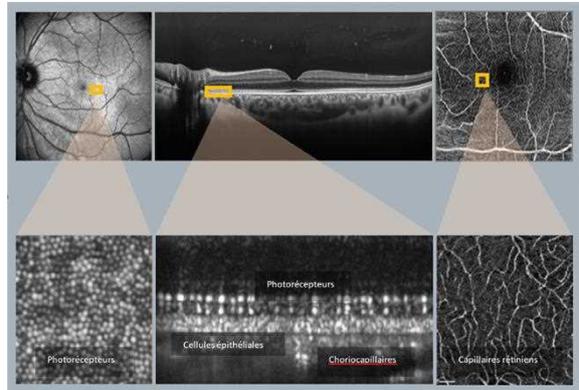
For sale on laboutique.edpsciences.fr

ISBN : 978-2-7598-2745-9
168 illustrated pages
Price : 95 €

L'AMBITION DE DÉMOCRATISER L'OA DANS L'ŒIL

Créé fin 2003, le projet Imagine Eyes trouve ses origines dans une collaboration entre Imagine Optic et Essilor lentille de contact. Il s'agissait en 1999 dans le cadre d'un projet européen de mesurer les aberrations de l'œil, à l'aide d'un analyseur de front d'onde. Les bons résultats du projet, ainsi qu'un marché émergent (besoin exprimé dans la communauté du LASIK) nous poussèrent à créer une activité de fabrication d'instruments pour l'ophtalmologie (aberrromètre) après 2 ans d'incubation au sein d'Imagine Optic et en s'appuyant sur un talentueux porteur de projet, Nicolas Château. L'entreprise fut lauréate au concours national de création d'entreprise (actuel iLab) et obtint la certification ISO 13485 dès 2005, ce qui permit un lancement commercial rapide et un développement régulier de l'entreprise.

Simultanément, nous suivons les développements d'une autre application, plus complexe à mettre en œuvre : il s'agit d'imager la rétine en s'affranchissant des aberrations de l'œil, générées par la cornée et le cristallin. Les premiers résultats sont portés par les équipes de D. Williams à Rochester [1] puis par des noms tels que Roorda, Drexler ou Fujimoto. Nous comprenons rapidement l'intérêt et le potentiel de cette approche. Nous n'avions pas encore toutes les briques technologiques mais nous avons le savoir-faire, avec notamment le soutien d'Imagine Optic qui démontra la première boucle d'OA haute précision en 2000. C'est tout naturellement qu'en 2005 une collaboration se met en place avec le LAOG (Laboratoire d'Astrophysique de Grenoble), suite à un projet ANR, pour finaliser le développement et le transfert d'un miroir déformable à actionneurs magnétiques. C'est une technologie développée pour l'astrophysique mais dont nous avons compris rapidement qu'elle était parfaitement adaptée pour l'ophtalmologie. Le CNRS nous accorde alors une licence exclusive hors astrophysique pour cette technologie.



Imagerie multimodale (OCT, OCTA, SLO) et multi-échelle de la rétine. Au-dessus et de gauche à droite, des images grand-champ classiques de la rétine, respectivement SLO, OCT et OCTA. En dessous, les détails respectifs de ces images obtenus grâce à une optique adaptative : on observe des détails au niveau cellulaire.

Notre vision est alors simple (et complexe à la fois) : faciliter l'utilisation de l'OA pour tous et proposer un système intégré utilisable par des docteurs. Les premiers systèmes sont développés par des scientifiques : ils sont certes performants mais complexes, volumineux, lents à l'acquisition (ce qui est très pénible pour les quelques patients qui participent à des essais). Nous mettons au point la première caméra rétinienne avec optique adaptative en 2012 (le rtx1) puis démarrons en 2017 le développement de la première caméra rétinienne multimodale et multi-échelle, capable d'afficher des modalités grand champ classiques (OCT, OCTA, SLO) et leur pendant petit champ haute résolution (OA-OCT, OA-OCTA, OA SLO).

multiples stratégies en œuvre pour contrer ces réflexions (ce qui a donné notamment un brevet).

D'autres difficultés techniques résolues par un engineering poussé : trouver les bons compromis flux (sécurité oculaire) / vitesse/précision, superposition de plusieurs fonctions optiques (OA, imagerie, cible de mise au point, éclairage etc...). A cela il faut ajouter les aspects réglementaires complexes (nouveau règlement européen).

Un dernier point clé : le système doit être utilisé par un médecin qui se concentre sur son patient et non sur la technologie. Il a donc été nécessaire

d'automatiser entièrement la boucle d'optique adaptative : aucune intervention n'est nécessaire (pas de réglage, pas de paramétrage) par le docteur pour obtenir une image de la rétine avec une résolution cellulaire. C'est la première fois qu'un système d'OA est intégré de manière totalement transparente à un instrument médical.

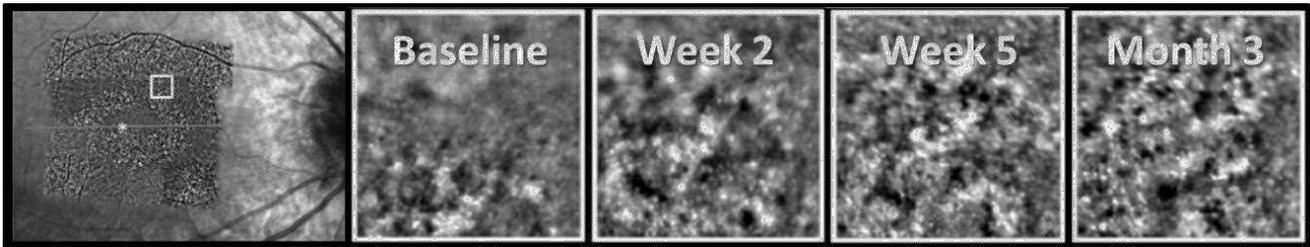
L'OA : QUELS AVANTAGES, POUR QUELLES APPLICATIONS ?

L'optique adaptative (OA) est une technologie avancée qui a le potentiel de transformer l'imagerie rétinienne, offrant des possibilités

uniques en termes de résolution, de précision et de diagnostic précoce. Cela va être une véritable révolution de l'approche « suivi de la santé » d'un patient :

Amélioration de la résolution :

L'optique adaptative permet de corriger en temps réel les distorsions causées par les aberrations optiques de l'œil. Cela permet d'obtenir des images de la rétine avec une résolution beaucoup plus élevée (limite de diffraction), révélant les détails microscopiques des structures présentes (photorécepteurs, petits



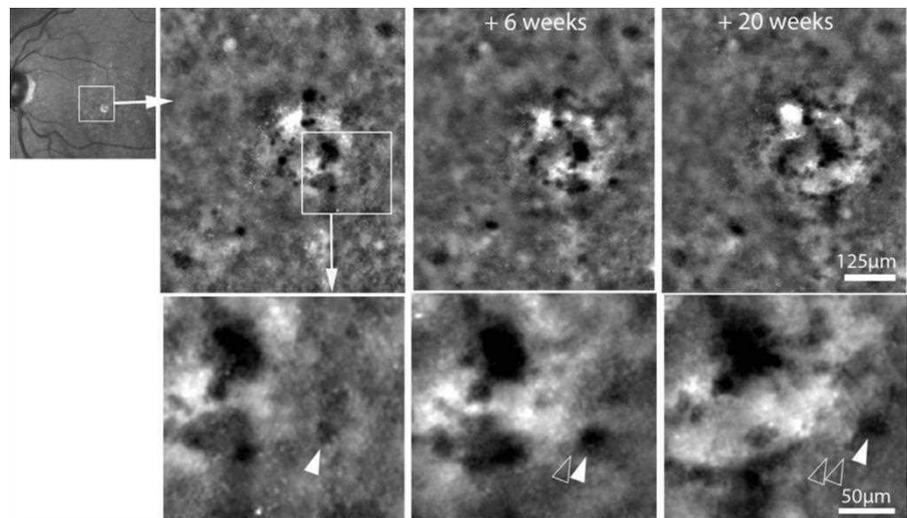
vaisseaux, paroi des vaisseaux etc...) qui étaient auparavant invisibles avec les technologies conventionnelles. Voir et suivre l'évolution des cellules individuelles est dorénavant possible en routine : on peut donc observer l'évolution des maladies de la rétine.

Diagnostic précoce des maladies rétinienne : L'optique adaptative permet de détecter des changements fins dans la rétine bien avant qu'ils ne soient visibles avec les méthodes traditionnelles. Cela permet un diagnostic précoce de maladies telles que la dégénérescence maculaire liée à l'âge, la rétinopathie diabétique et d'autres affections rétinienne, permettant ainsi une intervention rapide et une gestion anticipée des maladies.

Suivi détaillé de la progression des maladies : Avec l'OA, les cliniciens peuvent suivre avec une ●●●

Figure 3. Monitoring de la restauration des photorécepteurs de la rétine par un traitement de thérapie génique (voretigene neparovvec) dans un cas de dégénérescence héréditaire – Université de Tübingen.

Figure 4. Évolution en forme et en position des amas HCR à T0, T0 + 6 semaines et T0 + 20 semaines. Les positions au moment de la mesure sont marquées par des triangles pleins, alors que les mesures précédentes sont signalées par des triangles vides (tirée de Paques et al. Prog in Ret and Eye Res **66**, 1 (2018)).



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

précision sans précédent la progression des maladies rétinienne, à l'échelle de quelques jours. Cela ouvre des perspectives pour l'évaluation rapide de l'efficacité d'un nouveau traitement, enjeu clé pour les entreprises pharmaceutiques. Cela permet également d'ajuster les traitements plus efficacement et par conséquent d'améliorer les résultats pour les patients. Ce monitoring thérapeutique conduit à la personnalisation des traitements. Ce suivi est applicable non seulement aux maladies de la rétine mais également à des maladies s'exprimant par des biomarqueurs dans l'œil.

Recherche sur la fonction rétinienne : La capacité de l'optique adaptative à fournir des images détaillées de la rétine offre aussi un potentiel pour la recherche fondamentale sur la fonction rétinienne et les mécanismes des maladies. Par exemple, dans l'étude de la progression de la DMLA sèche, la caméra rétinienne avec optique adaptative (rtx1) utilisée par l'équipe de M. Paques de l'Hôpital National des Quinze-Vingts a révélé un nouveau biomarqueur candidat pour cette pathologie : les amas (mélanine) hyporéfléchissants (HRC) qui s'accumulent et migrent au cours de la progression de la maladie semblent être liés au processus inflammatoire dans la progression de la maladie. Bien que les HRC soient invisibles avec d'autres techniques d'imagerie, l'optique adaptative a permis d'observer leur mouvement en quelques jours [2,3].

Suivi des maladies vasculaires : en ayant accès aux détails des vaisseaux et en particulier à l'épaisseur des parois, l'OA donne accès au WLR (« Wall to Lumen Ratio »). Il s'agit d'un biomarqueur de l'hypertension et du risque vasculaire plus généralement.

Les quelques exemples ci-dessus illustrent le champ des possibles avec l'amélioration des performances d'imagerie offerte par l'optique

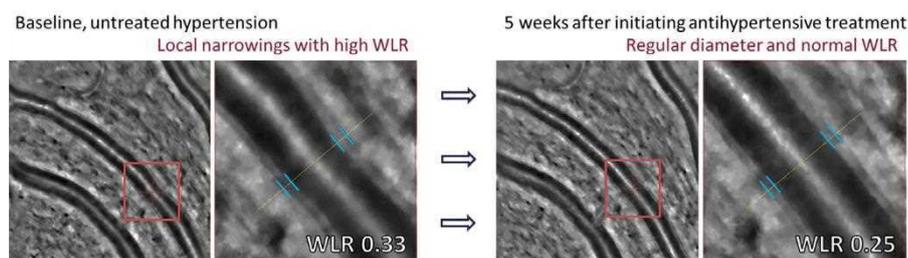


Figure 5. Sur cette image, dans un cas d'hypertension non traitée, nous observons des rétrécissements locaux dans une artériole rétinienne, où le rapport WLR mesuré est plus élevé que la normale. Dans le même cas, après 5 semaines d'un traitement adapté, le calibre du vaisseau est devenu plus régulier et le rapport WLR est revenu à une valeur normale. Credit: Pitié-Salpêtrière Hospital, Paris, France.

adaptative. De nombreuses applications sont en cours d'investigation, comme par exemple le suivi de l'implantation de cellules souches sur la rétine (Kobe Eye Center) ou le suivi des patients après avoir subi un accident vasculaire cérébral (Hôpital National des Quinze-Vingts).

Un autre champ pourrait également s'ouvrir : celui de la chirurgie de la rétine. Tout comme il est possible de voir la rétine avec une très haute résolution, il est possible de focaliser un laser chirurgical sur la rétine avec la même résolution (soit 2-3 μm) ouvrant la voie vers des procédures moins invasives et mieux ciblées.

CONCLUSION : UNE RÉVOLUTION ?

En résumé, l'optique adaptative présente une avancée majeure pour le domaine de l'imagerie rétinienne, promettant des améliorations significatives dans le diagnostic, le monitoring thérapeutique et la recherche sur les maladies rétinienne et non rétinienne. Les images haute résolution obtenues grâce à cette

technologie offrent une vue sans précédent de la rétine, ouvrant de nouvelles perspectives pour l'évaluation de la santé des patients.

Une nouvelle ambition se dessine autour de cette technologie : demain, grâce à l'optique adaptative et à l'intelligence artificielle, il sera possible de suivre la santé globale d'un patient grâce à une analyse par imagerie rétinienne, il sera possible de prévenir non seulement des maladies oculaires qui ne cessent de croître avec le vieillissement de la population mais également des maladies vasculaires et neurodégénératives (dont les signes précurseurs pourraient être observés 20 à 30 ans avant les premiers symptômes !), il sera possible de personnaliser les traitements en fonction des réponses observées dans la rétine... Ainsi, pour des fins moins macabres que dans le film de Michael Bay, « The Island », le scan rétinien deviendra un véritable marqueur de notre santé et nous permettra de privilégier une médecine préventive moins coûteuse et plus efficace pour le patient. ●

RÉFÉRENCES

- [1] J. Liang, D. R. Williams, D. T. Miller, *J. Opt. Soc. Am. A* 14, 2884(1997)
2. M. Paques *et al.*, *Prog. Retinal Eye Res.* 66, 1 (2018)
3. K. Gocho *et al.*, *Invest. Ophthalmol. Visual Sci.* 54, 3673 (2013)

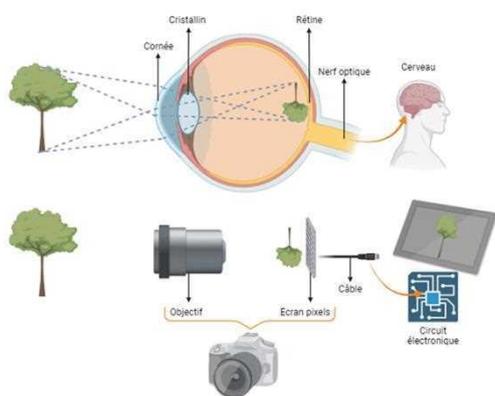
COMPRENDRE LE SYSTÈME OPTIQUE DE L'ŒIL

Pedro MECÉ^{1,*}, Elena GOFAS-SALAS²

¹ Institut Langevin, CNRS, ESPCI Paris, Université PSL, 1 rue Jussieu 75005 Paris, France

² Sorbonne Université, INSERM, CNRS, Institut de la Vision, 17 rue Moreau, F-75012 Paris, France

*pedro.mece@espci.fr



Bien qu'apparemment plus simple que les caméras, l'œil humain est un instrument optique remarquablement robuste, qui projette des images haute résolution sur la rétine grâce à son système optique unique. Depuis le XVII^e siècle, la compréhension des subtilités optiques de l'œil humain suscite un intérêt croissant. Nous présentons ici quelques notions de base pour comprendre le système optique de l'œil, sa complexité due à sa nature biologique, et comment le modéliser optiquement.

<https://doi.org/10.1051/phys/202312757>

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.

Lœil humain, malgré sa simplicité apparente, est un instrument optique extrêmement robuste. Composé de deux lentilles positives, la cornée et le cristallin, il projette des images du monde sur la rétine, déclenchant ainsi le processus visuel. Bien que sa structure puisse sembler rudimentaire comparée aux caméras modernes, souvent constituées de nombreuses lentilles pour améliorer la qualité de l'image lorsque l'on travaille sous une variété d'angles et de longueurs d'ondes, l'œil humain est bien adapté aux exigences du système visuel. Il réussit la lourde tâche de créer des images d'une grande résolution et un large champ de vision, couvrant des objets à diverses distances, en utilisant des tissus vivants transparents plutôt que du verre. Bien que la formation d'images dans l'œil soit similaire à celle des caméras et doive respecter les principes optiques établis, il existe quelques différences intéressantes dues à la nature biologique de l'œil. La différence la plus significative réside peut-être dans le caractère vivant de l'œil, qui réagit à son environnement afin d'obtenir la meilleure image dans diverses circonstances. En outre, il grandit, vieillit et peut être affecté par des maladies.

Comprendre le système optique de l'œil et être capable de le modéliser est un sujet de recherche depuis le XVII^e siècle, avec les travaux pionniers de Christian Huygens, Isaac Newton et René Descartes. La conception d'un modèle optique de l'œil va au-delà de la simple compréhension de sa structure, et englobe tous les aspects liés à l'étude de cet organe. Cela inclut le développement d'instruments de mesure et d'imagerie spécialisés, ainsi que l'interprétation des données, et influence même directement la pratique clinique. Ainsi, les modèles font émerger des idées et évoluent en parallèle avec les nouvelles connaissances expérimentales. Ce domaine de recherche reste très dynamique, comme en témoignent les récentes publications qui ont inspiré cet article [1,2,3].

STRUCTURE ET OPTIQUE DE L'ŒIL

Comme les caméras, l'œil est composé d'optiques réfractives (cornée et cristallin), d'une ouverture pupillaire (définie par l'iris) et d'un photodétecteur (la rétine). La lumière qui atteint l'œil est d'abord réfractée par la cornée, un mince tissu transparent et avasculaire qui permet à la lumière de pénétrer dans l'œil. Étant donné que la plus grande différence d'indice ●●●

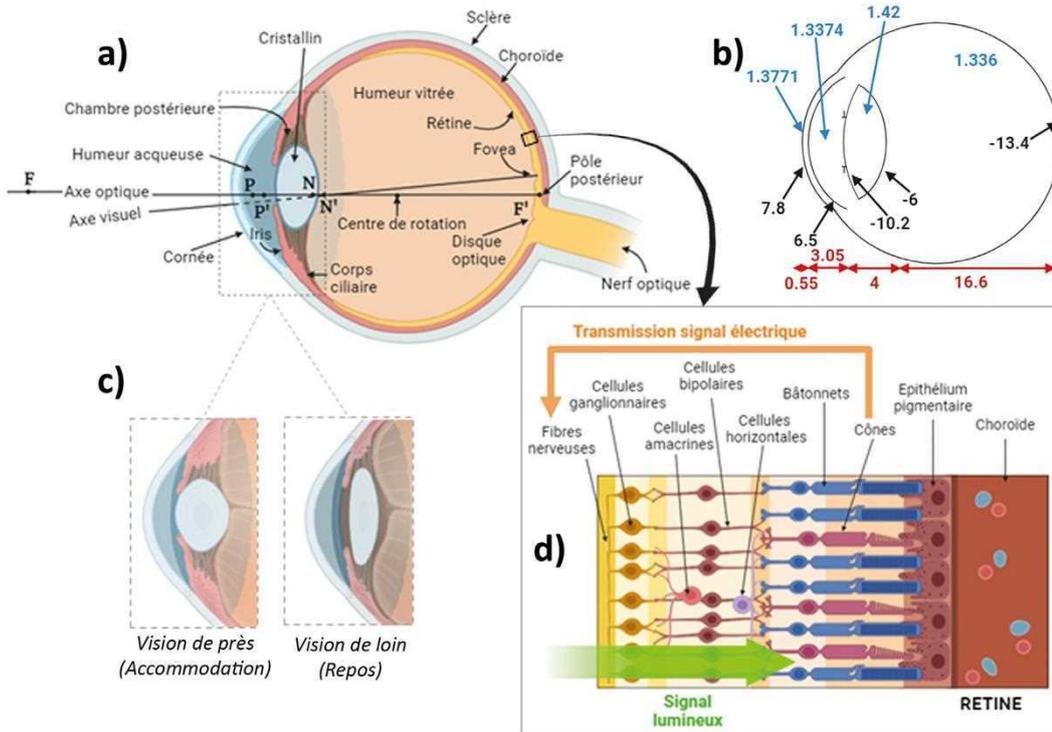


Figure 1. Représentation schématique de la structure, de la géométrie et des informations optiques de l'œil. **a)** Coupe horizontale de l'œil droit en vue de dessus. **b)** Indices de réfraction (bleu), rayons de courbure (noir) et distances en millimètres (rouge) [3]. **c)** Effet de l'accommodation du cristallin. **d)** Structure de la rétine avec son organisation stratifiée. Images créées avec BioRender.com

de réfraction se produit entre l'air et la cornée (en fait le film lacrymal), celle-ci représente la majeure partie du pouvoir de réfraction de l'œil - environ 43 dioptries, soit environ 70% du pouvoir optique total de l'œil. Un film lacrymal aqueux sur la cornée garantit que la première surface optique soit régulière, pour optimiser la qualité de l'image. Après avoir traversé la cornée et la chambre antérieure, remplie d'humeur aqueuse transparente (une substance semblable à l'eau), la lumière atteint l'iris. L'iris contient deux types de muscles lisses qui agissent comme un diaphragme, régulant la quantité de lumière entrant dans l'œil, et influençant ainsi la qualité de l'image rétinienne. En particulier, la taille de l'ouverture varie en fonction de la lumière ambiante, allant de moins de 2 mm de diamètre en cas de forte luminosité à plus de 7 mm dans l'obscurité.

À la suite de l'iris, la lumière atteint le cristallin, deuxième optique réfractive de l'œil. Ce dernier est une lentille élastique biconvexe dont le pouvoir de réfraction est d'environ 18 dioptries dans son environnement naturel. Contrairement à la cornée, dont le pouvoir optique est fixe, le cristallin est un élément optique actif, dont la forme est contrôlée par les muscles ciliaires, permettant de modifier la puissance de l'ensemble de l'œil (jusqu'à 15 dioptries). C'est la base du mécanisme d'accommodation qui permet à l'œil de faire la mise au point sur des objets placés à des distances différentes. La capacité à faire la mise au point sur des objets proches diminue continuellement avec l'âge jusqu'à la presbytie, où le sujet perd sa capacité d'accommodation. Une fois réfractée par le cristallin, la lumière pénètre dans la chambre postérieure remplie d'humeur vitrée transparente et atteint finalement la rétine.

La rétine est une fine couche de tissu neuronal qui recouvre l'arrière du globe oculaire, agissant comme un écran où se

forment les images et où la lumière est convertie en signaux électrochimiques par les photorécepteurs. Elle présente une organisation stratifiée composée de différentes couches de neurones interconnectés. Les couches neuronales superficielles et intermédiaires jouent un rôle spécifique dans le traitement visuel et la transmission du signal visuel au cerveau (par le nerf optique). Les photorécepteurs, situés à l'arrière de la rétine, sont de deux types : les bâtonnets, pour la vision à faible luminosité, et les cônes, pour la vision des couleurs en forte luminosité. La rétine humaine comporte une zone centrale, la fovéa, où les cônes sont densément regroupés pour offrir la meilleure résolution. Les yeux bougent continuellement pour fixer les détails souhaités dans la fovéa. Les régions périphériques de la rétine, où les bâtonnets sont densément concentrés, offrent une résolution plus faible, mais sont spécialisées dans la détection des mouvements et des objets dans le champ visuel. Le champ typique couvert par l'œil est assez large par rapport à la plupart des caméras (au moins $160^\circ \times 130^\circ$).

La Figure 1 montre une représentation schématique de l'œil avec les principales structures, géométries et informations optiques. Bien que chaque œil soit intrinsèquement unique, ces données doivent être considérées comme des valeurs moyennes et sont utiles à des fins de généralisation.

Un œil adulte moyen a une longueur axiale de 24 mm et restitue sur la rétine des objets éloignés avec une mise au point précise. Cette situation idéale est appelée emmétropie. Cependant, la plupart des yeux n'ont pas les propriétés optiques et les dimensions adéquates pour une mise au point parfaite ; ils sont affectés par des erreurs de réfraction optique. Dans ce cas, les images formées sur la rétine sont floues, imposant généralement une limite inférieure à la perception visuelle. Les erreurs de réfraction

sont classées en myopie, lorsque les images d'objets éloignés sont focalisées en avant de la rétine, et en hypermétropie, lorsque les objets éloignés sont focalisés en arrière de la rétine. En outre, chez chaque personne, l'œil ne présente pas la symétrie de rotation. Une manifestation courante de ces faits est la présence d'astigmatisme : l'image rétinienne d'une source ponctuelle est composée de deux lignes perpendiculaires à des distances focales différentes. Même les yeux exempts d'erreur de réfraction (sans défocus et sans astigmatisme) ne produisent pas des images parfaites, en raison des aberrations optiques d'ordres supérieurs.

L'ŒIL : UN SYSTÈME OPTIQUE LOIN DU PARFAIT

Du point de vue de l'optique géométrique, l'œil n'est pas un système rigoureusement stigmatique : l'image d'un point n'est pas un point. Le tracé des rayons à travers un œil réel révèle des aberrations transversales et longitudinales au plan focal de l'image. Ces aberrations peuvent être décrites en termes de front d'onde dans le plan de la pupille. La pupille de l'œil pouvant être considérée comme approximativement circulaire, l'une des façons les plus courantes de décrire les aberrations oculaires consiste à les décomposer comme une combinaison linéaire de polynômes de Zernike orthonormés. Les aberrations oculaires corrigées par les lunettes et les lentilles de contact peuvent être décrites par les modes de Zernike d'ordre 2 (aberrations de bas ordre), qui sont les plus importants en termes d'amplitude. Pour modéliser en détail les défauts oculaires, il faut aller au-delà de l'ordre 2 (aberrations d'ordre supérieur). Par ailleurs, l'impact des aberrations oculaires sur la qualité de l'image est d'autant plus important que le diamètre de la pupille est grand (voir Fig. 2).

Pour illustrer la qualité du système optique de l'œil, la quantité d'aberrations d'ordre supérieur pour un œil normal et une pupille de 6mm de diamètre est d'environ $0,33 \mu\text{m rms}$ à 550 nm, ce qui équivaut approximativement à une défocalisation

de 0,25 D. Cette erreur est minimale et n'est généralement pas corrigée lors du traitement clinique des erreurs de réfraction. Cependant, si l'on applique les critères de qualité utilisés pour évaluer les performances des caméras, l'œil présente des performances médiocres. Selon le critère de Maréchal, un système est effectivement corrigé si l'erreur de front d'onde est inférieure à $\lambda/14$. Pour une longueur d'onde centrale visible, c'est environ 8 fois moins que ce que l'on trouve dans un œil typique. Conscient de la mauvaise qualité de l'optique de l'œil, Helmholtz déclara un jour [3] : « Si on me proposait un instrument d'optique avec toutes ces défauts (celles de l'œil humain), je le refuserais catégoriquement ». Pourtant, Helmholtz savait parfaitement que l'optique de l'œil était en fait bien adaptée pour servir le système visuel [3]. Bien que les aberrations soient en moyenne similaires, chaque œil possède ses propres caractéristiques spatiales. Enfin, les aberrations oculaires peuvent être classées en trois catégories : statiques (principalement dues aux imperfections de l'optique réfractive de l'œil), dynamiques (composante variable dans le temps principalement due à la dynamique du film lacrymal et à l'accommodation) et chromatiques (dues à la nature dispersive de l'œil).

LES MODÈLES OPTIQUE DE L'ŒIL ET LEUR COMPLEXITÉ

Une modélisation complète du système optique de l'œil peut s'avérer très difficile, étant donnée sa complexité unique, qui nécessite la création de modèles distincts pour chaque composant (cornée, cristallin, iris, etc.). Voici quelques-unes des principales complexités du système optique de l'œil : 1) le cristallin a une structure à gradient d'indice ; 2) contrairement aux caméras, l'œil n'est pas un système optique centré, puisque l'axe optique ne coïncide pas avec l'axe visuel, où se trouve la fovéa, qui est légèrement décentrée d'environ 5° ; 3) les cônes peuvent être modélisés comme des guides d'ondes orientés vers le ●●●

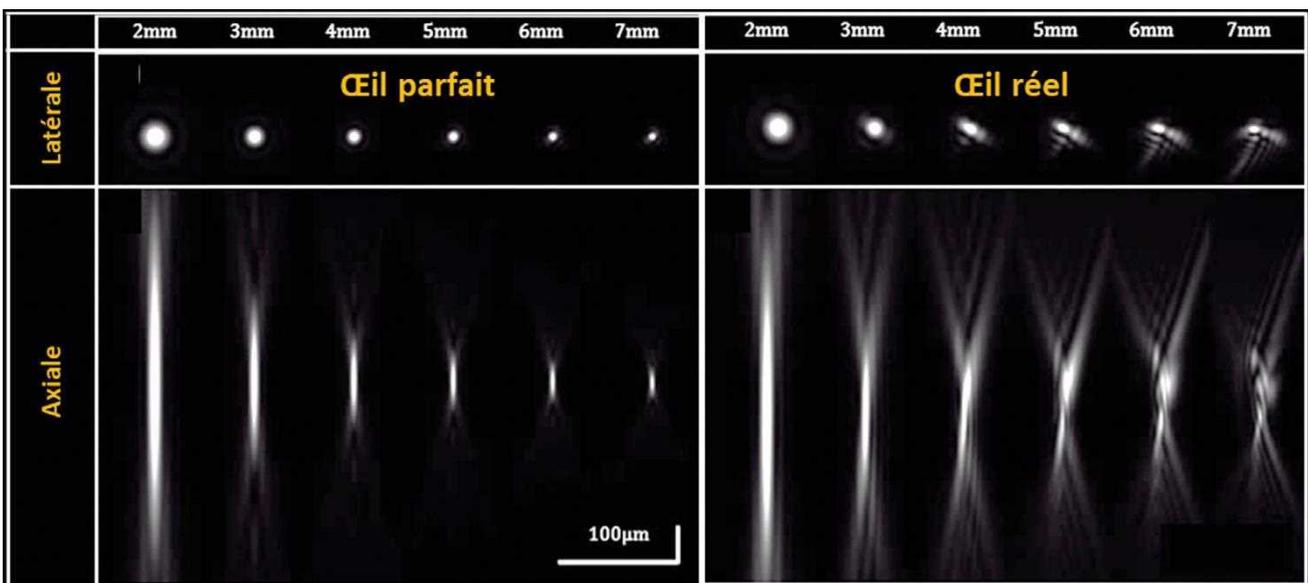


Figure 2. Image 3D d'un point pour un œil parfait et réel pour différentes tailles de pupille (de 2mm à 7mm).

a) Modèle d'œil réduit de Emsley

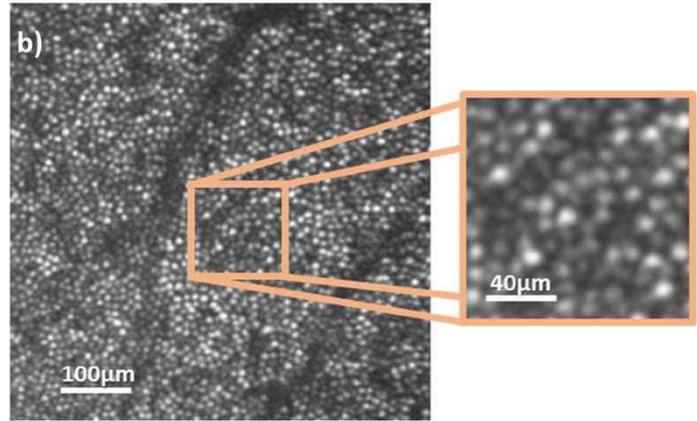
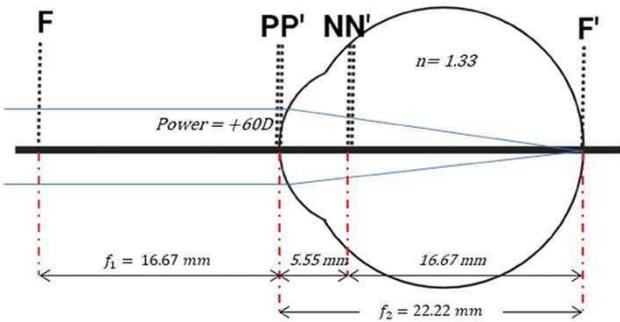


Figure 3. a) Modèle réduit d'œil d'Emsley composé d'un système centré avec une surface réfractive d'une puissance de 60 D séparant l'air du milieu oculaire d'indice 1,333 et d'une pupille située au sommet de la surface réfractive. **b)** Image de la mosaïque de photorécepteurs de la rétine humaine in-vivo prise avec un système d'OCT plein-champ assisté par Optique Adaptative [5].

centre de la pupille, de sorte que l'efficacité avec laquelle les rayons lumineux sont guidés vers les photorécepteurs varie en fonction de leur angle d'incidence par rapport à l'axe des photorécepteurs; 4) la description optique de l'œil évolue avec l'âge (la forme et le profil d'indice du cristallin changent) et en fonction de paramètres physiologiques oculaires, notamment le niveau d'accommodation du cristallin et l'épaisseur du film lacrymal sur la cornée. Une description plus exhaustive des différentes complexités optiques de l'œil peut être trouvée dans [1,2].

C'est pourquoi la littérature présente une grande variété de modèles, principalement basés sur les caractéristiques suivantes : 1) modèle réduit (une seule surface réfractive) ou anatomique (cornée et lentille) ; 2) monochromatique ou polychromatique (compte tenu de la dispersion de l'indice de réfraction) ; 3) performance optique paraxiale ou finie (qualité optique et d'image) ; 4) cristallin homogène ou à gradient d'indice (GRIN) ; 5) Sur l'axe ou grand angle ; 6) Non accommodé ou accommodé ; 7) Indépendant de l'âge ou vieillissant. Une telle variété de modèles reflète le fait que tous les modèles sont incomplets. Alors, quel modèle choisir pour une application donnée ?

QUEL MODÈLE OPTIQUE D'ŒIL UTILISER ?

Pour la conception optique, on pourrait penser que le modèle le plus anatomiquement correct disponible est le meilleur à utiliser. Cependant, ce modèle peut être trop complexe et difficile à manipuler pour certaines applications [1]. Par conséquent, Il est préférable de choisir le modèle le plus simple adapté à l'application, même s'il manque de précision anatomique, à condition qu'il reste fonctionnellement exact.

À titre d'exemple, pour les applications d'imagerie rétinienne (e.g. fond d'œil ou OCT), un modèle très simple tel que l'œil réduit d'Emsley (Fig. 3a) est déjà suffisamment précis pour certaines estimations de calcul telles que le champ de vision,

la résolution spatiale et les choix des optiques pour atteindre un tel grandissement. En outre, l'utilisation de ce simple modèle en conjonction avec des informations sur la distribution statistique des aberrations oculaires de l'œil sur l'axe en termes de coefficients de Zernike, permet la conception de systèmes d'imagerie très sophistiqués, tel qu'un système d'optique adaptative pour corriger les aberrations oculaires en temps réel, permettant d'imager la rétine humaine à l'échelle cellulaire [4,5] (Fig. 3b). En général, ce modèle est largement utilisé pour calculer facilement la puissance des lunettes, mesurer les erreurs de réfraction et calibrer les dispositifs optiques. Toutefois, il ne convient pas pour une analyse détaillée de la vision, ni pour l'étude de l'accommodation en raison de l'absence de cristallin. Dans de tels cas et d'autres encore, des modèles oculaires plus complexes sont nécessaires.

CONCLUSION

L'avenir réside dans des modèles oculaires personnalisés et plus sophistiqués. De tels modèles seront développés pour prédire individuellement les réfractions, les aberrations ou la qualité optique. Ils pourront être utilisés pour concevoir la lentille intraoculaire la mieux adaptée à une personne donnée (pour remplacer le cristallin naturel lors d'une opération de la cataracte), ou pour l'ablation de la cornée au laser afin de réduire les erreurs de réfraction dans des procédures telles que le LASIK. De nouveaux systèmes optiques pour les jeux vidéo ou la réalité augmentée seront, à un moment ou à un autre, couplés aux yeux [3]. En ce sens, tout ingénieur en optique bénéficierait d'une compréhension de base de l'œil, de la vision et des modèles optiques. ●

RÉFÉRENCES

[1] D. Atchison. *Optics of the human eye*. CRC Press, 2023.
 [2] R. Navarro, *J. Optom.* **2**, 3 (2009)
 [3] P. Artal, *Adv. Opt. Photonics* **6**, 340 (2014)
 [4] E. Gofas-Salas *et al.*, *Appl. Opt.* **57**, 5635 (2018)
 [5] J. Scholler *et al.*, *Opt. Lett.* **45**, 5901 (2020)

Laser sub-ns haute puissance



La gamme PicoSpear de Teem Photonics a été développée afin de produire des impulsions ultra-courtes, jusqu'à 650 pico-

secondes, et de maintenir une puissance de sortie élevée ajustable jusqu'à 500 mW. La gamme est conçue pour offrir avec un design compact une excellente qualité de faisceau avec un profil TEM00 gaussien et une valeur de $M^2 < 1,3$.

www.teemphotonics.com/news/teem-photonics-amplified-microchip-picospear-laser-series-launch/

EXTENSEUR DE FAISCEAU POUR LASER DE PUISSANCE

Ce nouvel extenseur de faisceau motorisé S6EZM0940-574 de Sill Optics est adapté à l'utilisation de lasers de haute puissance. Les lentilles de ce composant optique peuvent être déplacées de manière entièrement automatisée ce qui permet de régler le grossissement de 0.9x à 4x et la divergence avec une grande précision et une erreur de pointage de ≤ 0.2 mrad.



www.silloptics.de/en/power-sensors/pm10k-plus



Capteur infrarouge MWIR

Le capteur MWIR Seegnus de LYNRED a été conçu pour fournir des images haute résolution dans l'infrarouge moyen. Destiné aux équipements tactiques longue portée, il s'agit de son premier capteur infrarouge haute résolution très compact (format SXGA 1280x1024), à petit pas de pixel (7,5 μm), sensible dans l'infrarouge moyen (MWIR) et doté de la technologie « HOT » (High Operating Temperature). Le capteur permet d'augmenter de 20% les portées de détection/reconnaissance/identification (DRI) par rapport au précédent modèle VGA de Lynred dans cette catégorie de produits MWIR.

www.lynred.com

PEIGNE DE FRÉQUENCE MID-IR



Le Mid-IR Comb de Menlo Systems offre une source pour la métrologie de précision dans la plage spectrale du moyen infrarouge (mid-IR) de

3 à 14 μm . Cette région spectrale est très intéressante pour l'analyse moléculaire et la science des matériaux. Le peigne de fréquence optique peut couvrir les plages spectrales de 3 à 5 μm , 5 à 8 μm , ou 8 à 14 μm , et fournit jusqu'à 200 mW de puissance optique moyenne avec une large bande spectrale de 50 à 300 cm^{-1} .

www.menlosystems.com/events/news-press-releases/view/3138

Laser CO2 50W

Iradian Laser commercialise une version 50W de lasers CO2 compacts dans la série Eternity. Les dimensions mécaniques sont identiques, mais la



puissance est plus élevée. La série Eternity comprend désormais des lasers CO2 avec une puissance de 25, 30, 40 et 50 watts. La technologie laser brevetée d'Iradian repose sur un noyau en céramique, non réactif pour le mélange de gaz laser, et des électrodes métalliques qui excitent le gaz laser fixées à l'extérieur de la céramique pour prévenir fuite de gaz et contamination et donc améliorer la durée de vie.

www.optonlaser.com/fr/actualites#nouveaute-laser-co2-serie-eternity

V₃XLUM VESCEL Laser

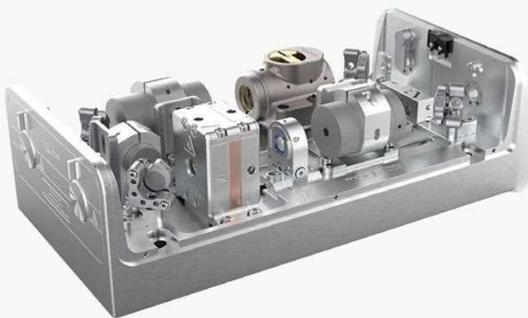
Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers



Transition	Sr	Yb	Sr+
Cooling	461 nm > 1,5 W	399 nm > 500 mW	421,7 nm > 1 W
Ionization	N/A	N/A	461 nm > 1,5 W
Narrow cooling	689 nm > 300 mW	556 nm > 5 W	N/A
Repump	679 & 707 nm > 500 mW	1389 nm > 1 W	1033 nm > 8 W
Clock	698 nm > 250 mW	578 nm > 1 W	674 nm > 1 W
Trapping (magic λ)	813 nm > 1 W	759 nm > 500 mW	N/A

- ▲ VALO SF de 700-2150 nm **up to 12 W**
- ▲ VALO SHG de 350-750 nm **up to 5 W**
- ▲ Finesse spectrale <100kHz (100 μ s)
- ▲ TEM_{0,0} M²<1.1
- ▲ **Prix attractif**
- ▲ **Stabilité sub-Hz démontrée**

maglabs



- ▲ **ECLD, TA, SHG, Ampli Fibrés** de 350 à 1970 nm
- ▲ Contrôleur ultra bas bruit, tout-en-1, PID inclus
- ▲ Lambdamètre Fizeau, bas-coût
- ▲ **Délai typique de 10 semaines**



Votre contact : Baptiste.Callendret@optonlaser.com

www.optonlaser.com