

Photoniques

LA LUMIÈRE ET SES APPLICATIONS

FOCUS

Lannion: des télécoms
à la photonique

OSEZ L'OPTIQUE

Réalité virtuelle
pour l'apprentissage

COMPRENDRE

Interférométrie
à décalage multilatéral

ACHETER

Analyseurs de taille
de nanoparticules

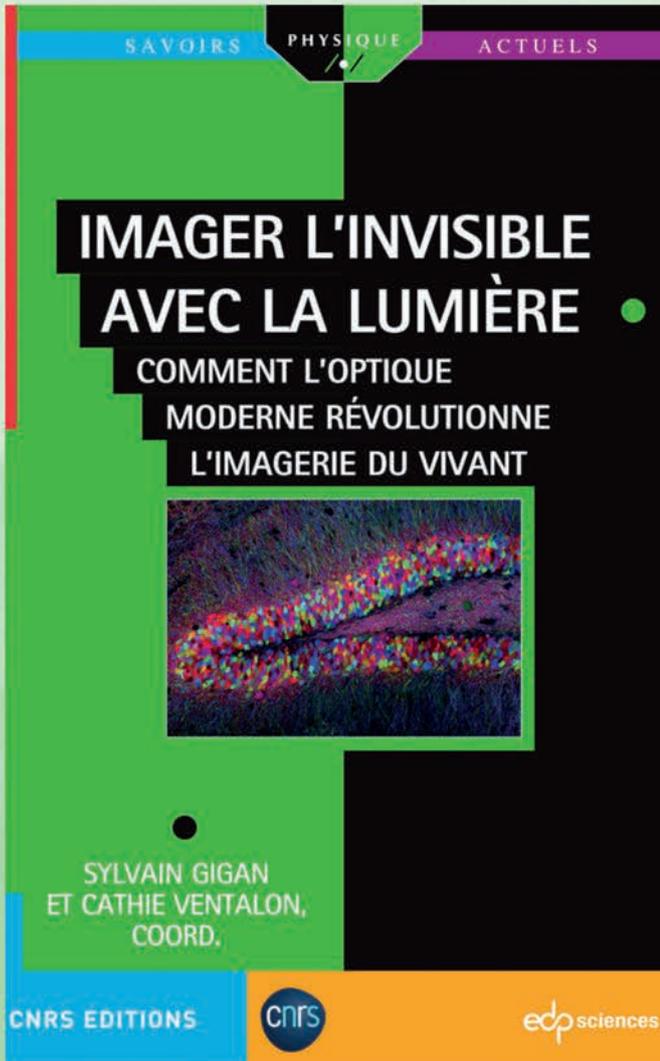
DOSSIER

LA PHOTONIQUE POUR LA SANTÉ

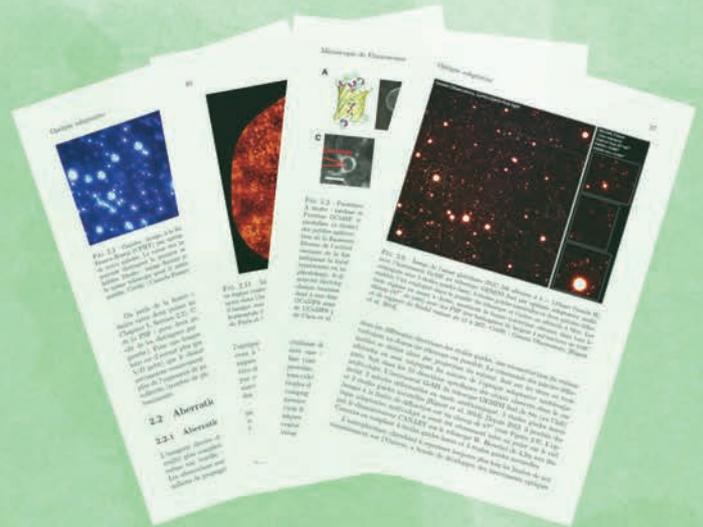
- De la Tomographie Optique par Cohérence Plein champ (FFOCT) à la Tomographie Optique par Transmission Plein Champ (FFOTT)
- L'imagerie de la peau par LC-OCT
- L'histologie Raman stimulée
- Optimisation de l'imagerie de Speckle dynamique dépolarié : vers une approche pratique et innovante en médecine

Comment l'optique moderne révolutionne l'imagerie du vivant

VIENT DE
paraître



COORDONNÉ ET ÉCRIT PAR
**CATHIE VENTALON ET
SYLVAIN GIGAN**



Disponible aussi en format e-book
En vente sur laboutique.edpsciences.fr

ISBN : 978-2-7598-2654-4
140 pages illustrées
Prix : 22 €

Notre œil est un outil exceptionnel qui reste néanmoins limité en résolution et en sensibilité. Même avec les appareils traditionnels de l'optique, comme les microscopes, il n'est pas possible de pénétrer les environnements complexes. Les nouveaux instruments, en particulier les lasers, ont permis des avancées considérables, notamment dans le domaine de la médecine.

Le livre présente de manière accessible les concepts physiques en jeu et montre que nous avons aujourd'hui des outils permettant de répondre à des questions fascinantes : comment fonctionne notre cerveau, neurone par neurone ? Peut-on détecter précocement un cancer ou des maladies de la rétine ?

Cathie Ventalon est chercheuse CNRS à l'institut de biologie de l'École normale supérieure. Elle développe de nouvelles méthodes optiques pour les neurosciences, dans le but d'étudier le lien entre l'activité neuronale et les comportements, la mémoire ou la perception sensorielle.

Sylvain Gigan est professeur à Sorbonne Université et chercheur au Département de Physique de l'École normale supérieure. Il travaille sur la propagation de la lumière, en particulier pour l'imagerie, dans les milieux complexes et biologiques.



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

Pierre Baudoz (Observatoire de Paris),

Marie-Begoña Lebrun (Phasics),

Adeline Bonvalet (CNRS),

Benoît Cluzel (Université de Bourgogne),

Sara Ducci (Université de Paris),

Céline Fiorini-Debuischert (CEA),

Sylvain Gigan (Sorbonne Université),

Aurélien Jullien (CNRS),

Patrice Le Boudec (IDIL Fibres Optiques),

Christophe Simon-Boisson (Thales

LAS France).

Advertising

Annie Keller

Cell phone : +33 (0)6 74 89 11 47

Phone/Fax : +33 (0)1 69 28 33 69

annie.keller@edpsciences.org

International Advertising

Bernadette Dufour

Cell phone + 33 7 87 57 07 59

bernadette.dufour@edpsciences.org

Photoniques est réalisé par

EDP Sciences,

17 avenue du Hoggar,

P.A. de Courtaboeuf,

91944 Les Ulis Cedex A, France

Tél. : +33 (0)1 69 18 75 75

RCS : EVRY B 308 392 687

Gestion des abonnements

abonnements@edpsciences.org

Impression

Fabrègue imprimeur

B.P. 10

87500 Saint-Yrieix la Perche

Dépôt légal : Janvier 2024

Route : STAMP (95)



IMPRIM'VERT

Éditorial



NICOLAS BONOD

Rédacteur en chef

Cercles vertueux : les atouts de la communauté de l'optique et photonique

La lumière permet l'émergence de la vie quand son instrumentation, notamment en microscopie, ouvre notre regard sur l'infinie richesse du monde vivant. Dans la continuité de ce cercle vertueux liant lumière et vivant, la photonique s'impose aujourd'hui comme une technologie clé pour le secteur médical. Les procédés photoniques offrent en effet un immense potentiel d'innovation pour la médecine et la santé. Ce sont désormais des instruments photoniques ergonomiques dédiés au domaine médical qui sont développés et commercialisés. Les degrés de liberté sont nombreux pour adapter les procédés photoniques aux besoins. Une seule et même technologie, celle du contrôle de la lumière, permet de réaliser une multitude d'actions. Loin d'occuper un marché de niche dans le domaine du médical, les procédés photoniques sont aujourd'hui développés pour imager, diagnostiquer, détecter, guider, opérer, traiter et soigner. Ce numéro vous présente plusieurs innovations marquantes dans le domaine de la santé et de la bio-imagerie. Nous avons créé il y a 2 ans la rubrique *Osez l'Optique* afin de mettre à l'honneur des démarches innovantes dans l'enseignement, l'apprentissage et la découverte de l'optique. *Osez l'Optique* vous propose ici une immersion dans le monde de la réalité virtuelle pour réaliser des expériences pratiques en

optique. Si les progrès en photonique ont permis la conception et la commercialisation de casques de réalité virtuelle, ces derniers permettent à leur tour aujourd'hui d'innover dans l'apprentissage en optique. Cette initiative révèle les vertus d'un autre cercle, celui liant recherche, innovation technologique, industrie et formation.

À l'heure où les besoins de réindustrialiser les territoires sont mis chaque jour en lumière, je vous invite à lire le focus de ce numéro qui retrace la formidable épopée scientifique et entrepreneuriale menée à Lannion et dans le Trégor. Vous découvrirez comment des décisions prises dans les années 1960 ont permis la mise en place de conditions favorables à l'émergence d'un écosystème scientifique prospère. Ce dernier a su se transformer, s'adapter et se développer pour devenir aujourd'hui un écosystème dynamique et moteur pour l'optique et la photonique. Et c'est sur la volonté de renforcer les différents piliers - recherche, innovation, industrie et formation - que repose cette réussite. C'est sur ce cercle vertueux que repose également la conception de chaque numéro de Photoniques, une aventure humaine au service de la communauté de l'optique et la photonique, qui met à l'honneur dans ses pages les initiatives et innovations dans ces 4 piliers.



Sommaire

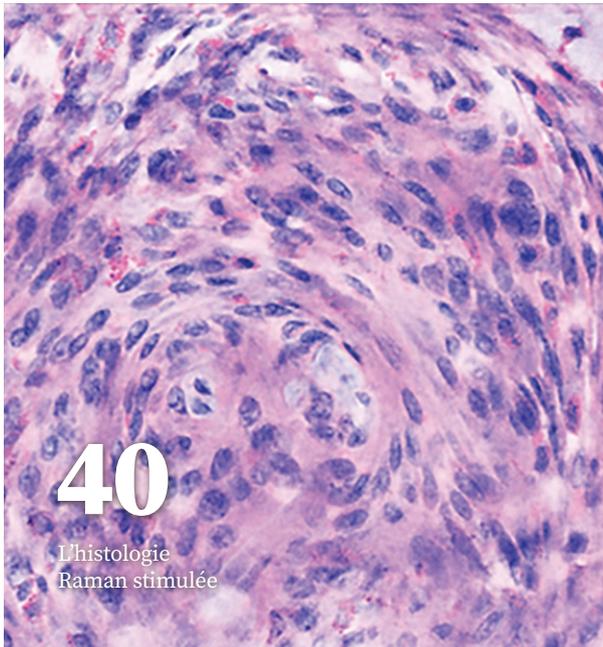
www.photoniques.com

N° 123

26

OSEZ L'OPTIQUE

La réalité virtuelle au service de l'apprentissage en photonique



40

L'histologie Raman stimulée

50

Comprendre l'interférométrie à décalage multilatéral



ACTUALITÉS

- 03 Éditorial et actualité de la SFO
- 05 Informations partenaires
- 13 Mots-croisés sur le thème optique et santé
- 14 Actualités scientifiques
- 15 Entretiens : François Salin, Riad Haidar

FOCUS

- 21 Lannion : du berceau des télécoms à une place forte de la photonique

OSEZ L'OPTIQUE

- 26 La réalité virtuelle au service de l'apprentissage en photonique

DOSSIER : LA PHOTONIQUE POUR LA SANTÉ

- 31 De la Tomographie Optique par Cohérence Plein champ (FFOCT) à la Tomographie Optique par Transmission Plein Champ (FFOTT)
- 36 L'imagerie de la peau par LC-OCT
- 40 L'histologie Raman stimulée
- 45 Optimisation de l'imagerie de Speckle dynamique dépolarisé : vers une approche pratique et innovante en médecine

COMPRENDRE

- 50 L'interférométrie à décalage multilatéral

ACHERETER

- 55 Un analyseur de taille de nanoparticules par diffusion dynamique de la lumière (DLS)

PRODUITS

- 61 Nouveautés

Annonceurs

2B Lighting 47	EDP Sciences II° de couv.	Laser 2000 49	Spectrogon 27
ALPhANOV 35	EPIC 09	Lumibird 23	Toptica 51
ARDOP 17	HEF Photonics 25	Opton Laser 39	Trioptics 41
Comsol 19	HTDS 37	Phasics 53	Wavetel 59
Edmund Optics 29	IDIL fibres optiques 33	Pyla Formation 43	
	Imagine Optic 57	SFO IV° de couv.	

Crédit photo (couverture) : Élise Coin

L'édito de la SFO



FRANÇOIS SALIN
Président de la SFO



ARIEL LEVENSON
Président sortant de la SFO

SFO, la collégialité au service de la communauté de l'optique !

La SFO est une grande famille. Les générations s'y succèdent en se transmettant un flambeau dont la flamme peut vaciller au grès des tourmentes mais ne s'éteint jamais. Notre brave prédécesseur Philippe Adam, qui termine son mandat de président sortant, peut en témoigner fort de son expérience en première ligne lors de la traversée des crises Covid. Si le passage de flambeau entre présidents est le propre de toutes les associations, notre collégialité à trois présidents, l'est moins. Nous profitons de l'intronisation du nouveau triumvirat pour en évoquer sa quintessence.

Avant tout, bienvenue et félicitations à Antoine Godard, élu président entrant. Un membre de l'ONERA remplace ainsi un membre de la DGA pour représenter le milieu « institutionnel ». La tradition se poursuit, avec ses trois présidents issus des trois composantes de notre communauté, « académique », « industrielle » et « institutionnelle ». Il s'agit en fait de bien plus qu'une tradition, c'est l'une des expressions de l'ADN de notre SFO, creuset de l'ensemble des communautés de l'optique-photonique, qui n'en forment qu'une en son sein. Une communauté nourrie et enrichie par sa diversité. Depuis quelques années il s'agit en effet pour notre gouvernance de bien plus qu'une tradition ou un symbole. Les trois présidents partagent les dossiers afin d'y apporter des visions complémentaires issues de nos histoires ancrées dans des milieux professionnels différents. Cette démarche, volontariste, a été également mise en place au sein du Conseil d'administration et du bureau qui en est issu. C'est une volonté affirmée de notre association de favoriser ce métissage des expériences, cet enrichissement partagé des points de vue et l'efficacité de nos actions en sortant de nos zones de confort.

Au-delà de la richesse apportée par cette collégialité, comment aurions-nous pu faire autrement ? Les dossiers, tous aussi passionnants les uns que les autres, ne manquent pas. En cet édito de fin d'année, jetons un coup d'œil dans le rétroviseur. L'année 2023 a été marquée par la création et les premières actions du Club Jeunes. Notamment les rencontres jeunes-Nobel, au sein d'un JNOG qui a battu les records de soumissions de contributions, de stands industriels et d'affluence, un grand merci à Alain Aspect pour sa présence ! Le Club Jeunes s'est également mobilisé lors d'EOSAM 2023 à Dijon, qui par ailleurs a été une réussite construite main dans la main lors d'un partenariat, inédit, avec l'EOS. L'année 2023 a été également marquée par le lancement de PÉPITES de l'optique française, un programme pluridisciplinaire, optique – histoire des sciences, conçu pour préserver et diffuser la mémoire et l'histoire de notre communauté dans toute sa diversité. Impossible ici d'être exhaustifs, mentionnons en guise de touche finale l'organisation de 3 écoles résidentielles, un autre record !

L'année de notre 40^e anniversaire se termine et la flamme continue de briller. Bienvenue aux nouveaux membres du CA, félicitations aux collègues réélus. Nous souhaitons à tous nos lecteurs une belle fin d'année et vous donnons rendez-vous en 2024 pour des passionnantes nouvelles aventures photoniques !

Photoniquement vôtre

Ariel Levenson

Directeur de recherche CNRS
Président sortant de la SFO

François Salin

Président et CEO Ilasis laser
Président de la SFO



OPTIQUE Normandie 2024, le plus grand congrès international francophone en Optique-Photonique

Du 1^{er} au 05 juillet, Rouen, ville historique par excellence, accueille le congrès phare de la Société Française d'Optique pour 2024. **OPTIQUE Normandie 2024** met en lumière la richesse de tous les secteurs de l'Optique-Photonique en France et offre une vision globale des recherches de pointe du fondamental à l'appliqué, des développements industriels et des innovations pédagogiques. Un moment incontournable pour des échanges fructueux dans une ambiance conviviale.



Alberto AMO
PhLAM - CNRS



Marwan ABDU AHMED
IFSW - Univ. Stuttgart



Camille BRES
EPFL



Anne Marie LAGRANGE
Observatoire de Paris - CNRS



Philippe LALANNE
IOGS - CNRS



Sandrine LEVEQUE-FORT
Univ. Paris Saclay - CNRS



Isabelle REGNER
Univ. Aix-Marseille



Pascal SALIERES
CEA



Pascale SENELLART
C2N - CNRS



Real VALLEE
COPL - Univ. Laval

OPTIQUE Normandie 2024, c'est l'engagement envers l'excellence! Nous sommes fiers d'annoncer que dix éminentes personnalités scientifiques ont accepté notre invitation pour exposer leurs travaux lors de conférences plénières. Le grand congrès OPTIQUE offre une véritable immersion scientifique avec plus de 250 posters et 80 heures de conférences parallèles orchestrées par 16 clubs et commissions de la SFO. C'est une célébration de la diversité thématique, créant une toile dynamique vibrante où l'innovation et les échanges éclairés sont à l'honneur. Explorez l'interface académie-industrie avec **une session dédiée aux relations industrielles**. Immergez-vous dans un grand espace d'exposition de plus de 40 stands mettant en vedette des start-ups innovantes. Plongez directement dans l'action et expérimentez de manière pratique les dernières avancées technologiques avec les **ateliers industriels**, animés par des experts de la technologie de l'Optique-Photonique.

L'enseignement et la formation sont au cœur de notre événement. Avec une session pédagogique, les REOD, Rencontres Enseignement de l'Optique et Didactique ainsi qu'une exposition d'une dizaine de manips, élargissez vos horizons éducatifs et découvrez des approches didactiques novatrices.

La commission '**Réussir la parité en Optique**' vous invite aux rendez-vous du 'lunch meeting' pour établir une proximité éclairée entre les nouvelles générations et les opticiennes confirmées. Un atelier animé par la Professeure et responsable de l'équipe Cognition et Neurosciences Sociales de l'université d'Aix-Marseille, Isabelle REGNER, incarne une démarche engageante,

fusionnant apports théoriques et savoir pratique. Joignez-vous à nous pour une expérience où la parité en optique n'est pas seulement un objectif, mais une réalité que nous construisons ensemble! Nous ferons ensemble de ce congrès, la plus belle vitrine des valeurs communes que nous portons : **l'ouverture, la solidarité, le dynamisme et l'excellence scientifique**.

Le Comité Local d'Organisation sous la présidence d'Ammar HIDEUR & Patrice CAMY composé des membres de CORIA, CIMAP, GPM, LOMC et SMS mettra tout en œuvre pour accueillir plus de 600 participantes et participants au cœur de la ville historique de Rouen.

Joignez-vous à nous pour une expérience Optique-Photonique exceptionnelle en 2024!

La plateforme de soumission est ouverte jusqu'au 15 février 2024
<https://www.sfoptique.org>

LE PLUS GRAND CONGRÈS DE L'OPTIQUE-PHOTONIQUE DE LA SFO

- + 600 PARTICIPANTS ATTENDUS
- + 40 STANDS INDUSTRIELS
- + 4 PRIX PRESTIGIEUX DÉCERNÉS
- + 7 H DE SESSIONS PLÉNIÈRES
- + 80 H SESSIONS THÉMATIQUES
- + 200 PRÉSENTATIONS ORALES
- + 200 POSTERS



Photonics PhD Days du 24 au 26 Janvier 2024 à Lannion : dernière chance pour vous inscrire !

Ces trois jours, entièrement anglophones, ont pour objectif de réunir les doctorants français et étrangers, les centres de recherche et les entreprises du domaine de la photonique, pour parler d'entrepreneuriat. Au programme : conférences, pitches de thèse, posters, atelier "de la thèse à la startup", rendez-vous individuels avec des chefs d'entreprise, réseautage, et visites d'entreprises et de centres de recherche locaux. Vous êtes doctorant ? Venez présenter votre thèse, découvrir les dernières recherches scientifiques en photonique, et participer au workshop pour explorer votre potentiel d'entrepreneur (huit heures sur deux jours) ! Le tout dans une ambiance conviviale, face à la mer (Perros-Guirec, Bretagne). De plus, grâce au projet européen Photonics4Industry, selon conditions d'éligibilité, vous pouvez bénéficier de 450€ pour couvrir vos frais de déplacement.

Ne manquez pas cet événement ! Il est encore temps de vous inscrire !

<https://www.photonics-bretagne.com/en/photronics-phd-days-24th-26th-january-2024/>

(Clôture des inscriptions : 12 janvier)

PHOTONICS BRETAGNE OUVRE SES PORTES AU GRAND PUBLIC



Photonics Bretagne a ouvert ses portes pour la première fois au grand public, dans le cadre de sa participation à la Semaine du Tourisme Economique & des savoir-faire. Sur 2 dates, ce sont plus de 90 personnes, dont 24 enfants/adolescents, qui ont eu l'opportunité de découvrir avec émerveillement les pouvoirs de la photonique ! Après une introduction pour comprendre ce qu'est la lumière, un photon, la photonique, une fibre optique, à quoi ça sert, et ce que l'on fait à Photonics Bretagne, ils ont visité les équipements et laboratoires. Autour du banc verrier et de la tour de fibrage, ils ont appris comment était fabriquée une fibre optique. Dans le laboratoire biophotonique, il s'agissait de montrer les développements et applications liés notamment à l'agriculture. Et de manière ludique et concrète, 3 ateliers leur ont permis de réaliser une soudure sur une fibre optique, mesurer le diamètre d'un cheveu avec un laser, et de voir leur fréquence cardiaque prise par capteur optique. Une belle opération de vulgarisation et de diffusion de la photonique, avec un public ravi et un taux de satisfaction de 100% !

BIENVENUE À NOS 8 NOUVEAUX ADHÉRENTS :

AEROTECH LTD (UK), FJEAN CONSULTING (77), KWAN-TEK (56), IMAGINE OPTIC (91), OPTOPRIM (92), AGRO INNOVATION INTERNATIONAL - GROUPE ROULLIER (35), TOMOMETRIX (29), VANGUARD AUTOMATION (D)

Wainvam-E devient Kwan-Tek

Wainvam-E, qui développe des solutions de métrologie utilisant des capteurs quantiques à base de diamant, a été reprise par le fonds régional Breizh Rebond et la Société financière Lorient développement (SFLD), après un redressement judiciaire. L'apport financier de plus de 2M€ lui confère aujourd'hui les moyens nécessaires pour son développement stratégique à l'échelle nationale et internationale, pour les secteurs de l'énergie, du nucléaire, de l'aéronautique, de la défense, voire du biomédical. La start-up bretonne (56) accompagne ce nouveau départ d'un changement de nom et devient KWAN-TEK.

L'avenir se dessine dès la classe de 4^e

Le Campus des Métiers et des Qualifications d'Excellence de Lannion, dont l'objectif est de créer du lien entre les élèves, les formations et les entreprises de la photonique, déploie actuellement une série d'animations auprès des collégiens de Lannion avec la contribution de Photonics Bretagne. Au programme, un parcours découverte interactif sur la photonique dispensé auprès de 900 élèves de 4^e et un stage de cinq jours à l'attention des élèves de 3^e incluant une initiation aux fondamentaux de la photonique, des visites d'entreprises, des ateliers pédagogiques et un projet de stage présenté devant un jury. Sur les 358 demandes de stage reçues, 90 conventions ont déjà été signées ! Un succès qui suscitera de nombreuses vocations, c'est certain !

AGENDA

■ Photonics PhD Days
24-26 janvier, Lannion

■ Photonics West
27 janvier-1^{er} février, San Francisco

■ OFC
24-28 mars, San Diego

■ Techno Conférence Quantique
4 avril, Lannion

■ Photonics Europe
7-11 avril, Strasbourg

En bref

Prix de l'Académie des sciences 2023

Deux membres du Laboratoire Charles Fabry (Institut d'Optique/CNRS/ Université Paris-Saclay) figurent parmi les lauréats :

Isabelle Bouchoule, directrice de recherche CNRS, et son collègue Jérôme Dubail (Laboratoire de Physique et Chimie Théoriques), ont reçu le prix Alexandre Joannidès/Fondation Joannidès de l'Académie des Sciences pour leurs travaux sur la dynamique des gaz unidimensionnels d'atomes froids.

Philippe Grangier, directeur de recherche CNRS, a été récompensé par le Prix Ampère de l'Électricité de France. Ce prix prestigieux récompense l'importance de ses travaux dans le domaine de la physique quantique.

AGENDA DE LA FORMATION CONTINUE

■ EF13

Acquisition d'images avec une caméra
Du 27/02 au 29/02/2024

■ EF2

Bases de l'optique
Du 12 au 15/03/2024

■ SC19

Vision industrielle
Du 18/03 au 20/03/2024

■ SC7

Mesure de front d'onde
Du 21/03 au 22/03/2024

■ EF4

Infrarouge thermique : choix et utilisation
Du 02/04 au 05/04/2024

■ SC9

Systèmes optiques d'imagerie
Du 22/04 au 26/04/2024

Tél. : 01 64 53 32 15
Plus sur :

www.fc.institutoptique.fr

CONTACT

Clémentine Bouyé, responsable de la communication

clementine.bouye@institutoptique.fr

Une fin d'année riche en événements de rencontre et d'échanges

Pour toutes et tous, la fin d'année rime souvent avec période chargée, projet à finaliser, budget à boucler. À l'Institut d'Optique, la fin d'année est aussi rythmée par un certain nombre d'événements incontournables de la vie l'école et de la filière photonique – le Forum de la photonique, le Gala SupOptique, la remise des diplômes. Ces temps de rencontre entre élèves, industriels, scientifiques, entrepreneurs et alumni sont l'occasion d'échanges, de questionnements et de partages d'expérience.

Un Forum de la Photonique repensé



Le Forum de la Photonique est le « forum entreprises » de l'Institut d'Optique, entièrement organisé par les étudiantes et étudiants. Cette année, l'équipe en charge avait pour ambition de le faire évoluer pour mieux répondre aux attentes des élèves et des entreprises et laboratoires présents.

Le 30 novembre 2023, plus de 400 étudiants et 170 exposants se sont rencontrés dans un nouveau cadre. Pour la première fois, le Forum s'est déroulé sur le iXCampus (Saint-Germain-en-Laye) au sein du château Saint-Léger, un lieu qui a conquis l'ensemble des participants.

La journée a été ponctuée par des conférences et des tables rondes, dont les thématiques avaient été sélectionnées par les élèves eux-mêmes. Cela a notamment donné lieu à des échanges et des débats entre industriels, acteurs de la recherche et étudiants autour des défis liés au changement climatique.

Cette 37^e édition est un véritable succès aux dires de toutes les personnes présentes. Pari réussi donc pour l'équipe du Forum !

Le Gala SupOptique, co-organisé par les étudiants et les anciens élèves

Dans la foulée du Forum, vendredi 1^{er} décembre, plus de 400 élèves, anciens élèves et personnels de l'Institut d'Optique se sont retrouvés, parés de leurs habits de lumière, sur la péniche Le Flow, au pied du Pont Alexandre III à Paris.

Ce magnifique écrin accueillait le Gala SupOptique, un événement co-organisé pour la 3^e fois par des élèves de 2^e année et SupOptique Alumni, l'association des anciens élèves de l'Institut d'Optique. Ce cadre plus informel, hors des murs de l'école, est l'occasion pour différentes générations de SupOpticiennes et SupOpticiens de faire connaissance autrement, de partager leurs expériences professionnelles et leurs souvenirs croustillants.



Finir en beauté

L'année s'est enfin clôturée par la remise des diplômes le 15 décembre dans l'amphithéâtre Alain Aspect de l'ENS Paris-Saclay. Cette cérémonie festive a célébré l'entrée dans la vie professionnelle de 120 jeunes ingénieures et ingénieurs, plus que motivés pour devenir actrices et acteurs du monde la photonique.

Des conférences et du réseautage à la Journée thématique « Vision industrielle pour le smart manufacturing » à Saint-Etienne

Les acteurs de la vision industrielle et du « smart manufacturing » se sont retrouvés le 30 novembre à Saint-Etienne lors de cet événement organisé par Minalogic, en partenariat avec CIMES, Coboteam, Telecom Saint Etienne et Saint-Étienne



Métropole. Plus de 80 personnes étaient présentes, industriels et académiques, représentant toute la chaîne de valeur. Les conférenciers ont pu présenter des briques technologiques, des capteurs, des équipements... Les industriels utilisateurs ont pu détailler comment la photonique, l'intelligence artificielle et la robotique, entre autres, pouvaient être utiles et être intégrées dans leur procédé de fabrication. De nombreux échanges ont eu lieu pendant les pauses, prémices de futures collaborations. L'accompagnement de Minalogic et de la Région Auvergne-Rhône-Alpes ont également été mis en avant, notamment sur les programmes Partenariats d'innovation, PhotonHub Europe, Easytech, MinaSmart.

Photonics West 2024 : Minalogic et ses adhérents à San Francisco

Photonics West, l'un des plus grands salons professionnels de la photonique, se déroulera du 27 janvier au 1^{er} février 2024 et accueillera plus de 1000 exposants et 20 000 visiteurs. Minalogic accompagnera Pyxalis et Teem Photonics sur le pavillon France, avec le soutien financier de la Région Auvergne-Rhône-Alpes. Le mot d'ordre de Minalogic « chassez en meute » s'appliquera comme à chaque déplacement de ce genre (CES, SIDO...). Nous espérons que cette expédition portera ses fruits et que nos adhérents reviendront avec des contacts prometteurs.

Election d'Erasmia Dupenloup à la Présidence de l'Alliance Silicon Europe



Erasmia Dupenloup, Déléguée Générale du pôle Minalogic, a été élue Présidente de l'Alliance Silicon Europe le 16 novembre 2023. Lancée en octobre 2015, l'Alliance Silicon Europe rassemble 12 clusters européens autour d'une ambition commune : renforcer l'industrie européenne du numérique et de la micro-électronique en favorisant les fertilisations croisées entre les 2000 membres de leurs écosystèmes d'excellence. Les membres de l'alliance sont des leaders dans le domaine des technologies numériques, incluant la micro et la nanoélectronique, la cybersécurité, la photonique et la robotique.

Participez aux Minalogic Business Meetings Le 17 mars 2024 à Saint-Etienne

La prochaine édition des MBM se tiendra au stade Geoffroy Guichard. Cette convention d'affaires internationale dédiée aux technologies du numérique permet aux offreurs de technologies et aux donneurs d'ordres venant du monde entier de réaliser jusqu'à 16 rendez-vous d'affaires qualifiés. Lors de l'édition 2023, 465 participants ont été accueillis et près de 1500 rendez-vous ont été organisés. Cette année sera exceptionnelle ! Nous fêterons les 10 ans des MBM avec une soirée d'anniversaire riche en surprises !
Profitez du tarif "Early Bird" jusqu'au 2 février 2024.

<https://www.minalogicbusinessmeetings.com>

MINALOGIC C'EST :

500 ADHÉRENTS,
DONT 158 EN PHOTONIQUE,
+ DE 11200 RENDEZ-VOUS B2B
DEPUIS 2005

4 SITES : GRENOBLE, LYON,
SAINT-ETIENNE, VALENCE

AGENDA

<https://www.minalogic.com/evenements/>

■ Photonics West 2023,
du 28 janvier au 2 février 2024
à San Francisco

■ Roadshow Minalogic,
du 23 janvier au 20 février sur toute
la région Auvergne-Rhône-Alpes

■ 10^e édition des Minalogic
Business Meetings,
le 17 mars à Saint Etienne



CONTACT

Laetitia Schoulteten
Responsable
Optique Photonique
06 21 96 71 83

laetitia.schoulteten@minalogic.com

Nouveaux adhérents

Bienvenue à nos nouveaux adhérents : Forum Photonique et Keranova.



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.

AGENDA

Nos prochains rendez-vous :

- **SPIE Photonics West**
27 janvier – 1^{er} février 2024
San Francisco

- **Business Meeting**
La Photonique avec l'ONERA
29 février 2024 - Palaiseau

- **Business Meeting**
La Photonique pour l'Agriculture
Mai 2024 - Rennes

- **SPIE Photonics Europe**
7-11 avril 2024 - Strasbourg

- **SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation 2024**
15 au 20 juin 2024 - Yokohama (Japon)

CONTACTER
PHOTONICS FRANCE

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

5^e édition des French Photonics Days : une réussite !



Les French Photonics Days se sont déroulés les 17 et 18 octobre à Strasbourg sur le thème « Procédés photoniques pour la Santé et l'Industrie ». La 5^e édition était coorganisée par Photonics France, SupOptique Alumni et l'Université de Strasbourg.

Chaque année, l'évènement rassemble les grands acteurs des sciences et technologies de la lumière pour leur présenter les points forts de la région et ainsi favoriser leur mise en réseau avec la communauté nationale.

Les journées étaient organisées au Pavillon Joséphine : un cadre bucolique où 160 participants sont venus soutenir la création de l'Institut de Photonique en Région Grand Est, présenté par Marc Sciamanna.

Le temps fort de cette année était l'intervention de Bernard Kress, directeur XR hardware chez Google et président de SPIE, the international society for optics and photonics, sur les nouvelles architectures de visualisation pour casques de réalité virtuelle compacts.

Retrouvez la restitution des journées, les présentations et les photos de l'évènement sur le site dédié à l'évènement : <https://fpd2023.fr>

Le CNSO devient la CoNSOL

Le CNSO, votre référent en sécurité optique et laser, devient la CoNSOL, une commission nationale de Photonics France :



La Commission Nationale de Sécurité Optique et Laser (CoNSOL) est l'interlocutrice privilégiée des entreprises et des pouvoirs publics confrontés au problème de la sécurité optique lors de l'utilisation de rayonnements optiques artificiels. Constitué autour d'acteurs majeurs de la filière optique-laser, il vise à jouer, via un réseau d'experts, une fonction de régulation dans le cadre de la réglementation.

Après 13 ans d'existence, la commission s'est fortement consolidée avec l'appui de Photonics France et l'intégration de nouveaux membres experts dans ses différents groupes de travail.

La CoNSOL participe à l'évolution de la réglementation, de la normalisation sur la sécurité optique et laser. Elle a pour mission de :

- Rassembler et diffuser toute l'information relative à la sécurité optique.
- Contribuer à la rédaction des textes réglementaires et des normes.
- Améliorer la prévention des risques dans les entreprises et les laboratoires.
- Garantir la qualité des formations via un réseau de formateurs labellisés validé par des experts.
- Promouvoir la sécurité optique.

Rejoignez la commission ! Découvrez toutes ses activités sur le site de Photonics France.



Make it EPIC!

Driving Competitiveness of
European Photonics Industry
with an International Network

Les dernières avancées technologiques en matière de matériaux et de photonique

L'évènement « Du matériau au composant photonique » s'est déroulé les 11 & 12 octobre 2023 au Château Carbonnieux à Léognan, un cadre d'exception près de Bordeaux. Lors de ces deux journées, le pôle ALPHA-RLH, Photonics France et le Pôle Européen de la Céramique ont réuni les experts industriels et scientifiques des domaines des matériaux et de la photonique.



Plus de 100 personnes ont pu assister à des conférences sur la réalisation de composants photoniques et des matériaux associés, sur leur contrôle métrologique et leurs applications dans de nombreux domaines : spatial, sciences du vivant,

technologies quantiques, mobilité et sécurité...

Pendant les pauses dédiées au réseautage, un espace exposants a permis à 12 entreprises de présenter leurs technologies et produits.

La 2^{ème} journée s'est clôturée par des

visites de la société Polyrise et des laboratoires CELIA (Centre Lasers Intenses et Applications) et IMS (Intégration du Matériau au Système).

Merci à OptoSigma, partenaire officiel de l'évènement, ainsi qu'à Lumibird et Saint-Gobain pour leur précieux soutien.

UN BEAU SUCCÈS POUR LA RENCONTRE DES ACTEURS DE LA BIO-IMAGERIE EN NOUVELLE-AQUITAINE

La dernière édition de BIPSA (Bio-Imagerie Photonique et Santé en Nouvelle-Aquitaine) en présentiel s'était déroulée il y a quatre ans, juste avant les années Covid-19. Cet évènement a fait son grand retour au Centre Broca à Bordeaux le 30 novembre 2023. Organisé par ALPHA-RLH, Bordeaux Imaging Center et l'Institut Interdisciplinaire de Neurosciences, il a rassemblé près de 130 participants (chercheurs, ingénieurs, industriels et étudiants). À travers des conférences d'experts académiques et industriels, la journée a mis à l'honneur les avancées et la valorisation de l'innovation dans le secteur de la bio-imagerie. Trois grandes thématiques ont été abordées : la microscopie, la biologie cellulaire et l'analyse d'images, sous l'angle des grands domaines d'applications : neurosciences, oncologie, bio-ingénierie...



Les compétences et les expertises d'industriels néo-aquitains et nationaux ont pu être présentées également par le biais d'un espace exposition, tandis que des travaux de recherche ont été mis en avant par une

session posters. Organisée en partenariat avec France-Biolmaging et l'Université de Bordeaux, avec le soutien de Oxsius, Spark Lasers et mu-Imagine, cette rencontre donnera lieu à une nouvelle édition en 2025.

RETOUR SUR LE FORUM EMPLOI DÉDIÉ À LA FILIÈRE AÉRONAUTIQUE, SPATIAL, DÉFENSE



Le 14 septembre 2023, le pôle ALPHA-RLH et le cabinet TMC ont organisé à Bordeaux un Forum Emploi & Industries Aéronautique, Spatial, Défense. Cet événement qui visait à apporter aux entreprises de la filière un appui pour répondre à leurs problématiques de recrutement a été rythmé par deux temps forts.

La matinée a été consacrée à des interventions et des tables rondes sur les métiers et les enjeux du secteur Aéronautique, Spatial, Défense.

Ont été abordés notamment les tendances pour demain en matière d'innovation dans la filière, les problématiques liées à l'employabilité, l'accompagnement au développement des talents et un focus sur les technologies photonique et hyperfréquences.

Puis un après-midi dédié à un job dating a favorisé les rencontres entre entreprises et candidats, potentiels futurs talents. Par le biais de stands, 19 recruteurs (PME et grands groupes) ont pu ainsi proposer plus de 600 postes, dont près de 300 en Nouvelle-Aquitaine. Les entreprises recherchaient des compétences en ingénierie, production, maintenance, conception, supply chain, management, gestion de projet, achats, marketing, vente... du niveau CAP à Bac + 5 et plus. Un franc et beau succès pour ce forum qui a rassemblé plus de 200 personnes : 90 professionnels et 112 candidats.

L'événement a été organisé avec le soutien du Ministère des Armées, de la DGA, de l'Agence de l'Innovation de Défense, de Bordeaux Métropole, de la Région Nouvelle-Aquitaine, du Pôle Emploi et de l'APEC.

Une Learning Expedition à Athènes à la découverte des micro-nanotechnologies

Du 31 octobre au 4 novembre 2023, le pôle ALPHA-RLH a organisé une *Learning Expedition* à Athènes. Elle avait pour objectif de découvrir l'écosystème photonique et électronique de la Grèce et de renforcer l'accord de partenariat entre ALPHA-RLH et le cluster photonique grec HPhos.

Le pôle a participé à la 10ème conférence internationale sur la micro-nanoélectronique, les nanotechnologies et les MEMS. Isabelle Tovena-Pécault, Directrice Europe & International, a fait une présentation sur le rôle des clusters européens dans le développement de l'innovation collaborative en utilisant ALPHA-RLH comme exemple. La présentation de Rubye Zehani, cheffe de projet NewSkin, portait quant à elle sur le rôle de l'Open Innovation Test Bed NewSkin dans l'accélération de l'adoption industrielle des nanotechnologies de surface.

La *Learning Expedition* a également permis de visiter l'Université Polytechnique Nationale d'Athènes, l'Institut des Nanosciences et des Nanotechnologies, la structure d'accompagnement Corallia ainsi que des entreprises innovantes, tout en facilitant les échanges autour des projets européens.



Financez vos projets de formation avec PIMAP4 Sustainability



Le projet européen PIMAP4 Sustainability lance son appel à projets "Services et formation" afin de soutenir les PME de la photonique, des matériaux avancés, de la fabrication avancée, de la métallurgie, de l'aérospatial et de la production industrielle au sens large, dans leur transition écologique et dans leur volonté d'internationaliser leurs activités.

Ces PME pourront ainsi obtenir un financement pouvant atteindre 10 000 € pour se former sur une de ces deux thématiques.

L'appel à projets est ouvert avec trois sessions de candidatures selon les dates de clôture suivantes : 10 janvier 2024, 10 mars 2024 et la clôture finale le 10 mai 2024.

Ces opportunités vous intéressent ? Pour connaître les différentes modalités de participation, contactez Xavier Alberola, chef du projet PIMAP4Sustainability : x.alberola@alpha-rlh.com

AGENDA

■ **L'automatisation de la production photonique : apports, enjeux et défis**
16 janvier 2024
à Vic-en-Bigorre

■ **Salon Photonics West**
30 janvier au 1^{er} février 2024
à San Francisco

Tous les événements sur
www.alpha-rlh.com

En bref

HORIBA

Horiba à la conquête de l'hydrogène !

« Le président d'Horiba France, Laurent Fullana, a implanté son nouveau centre d'expertise en hydrogène à Vénissieux, convaincu par la dynamique de la région lyonnaise. »
Bravo à Horiba !

(Source : Actu Lyon Décideurs, 8 septembre 2023).

AGENDA

■ WHAT'S ON C2N
7 mars 2024,

■ WHAT'S ON Horiba,
4 avril 2024

■ PhotonHub Demo
centre & UTT
L2n-UTT
23 janvier 2024

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

[Cosmetic 360] Salon COSMETIC 360 : la Région Île-de-France et Systematic créent un espace "Deep Tech for Industry"



La Région Île-de-France, appuyée par Systematic-Paris-Region, pôle de compétitivité européen des Deep Tech, propose sur Cosmetic 360 un parcours innovation dédié aux métiers de la cosmétique : l'Essence des Deep Tech.

Les PME membres de Systematic, représentant un véritable concentré de nouvelles technologies numériques, ont présenté leurs solutions percutantes qui font la différence dans de nombreux process industriels et business : AXEM, EMBODME, MCLedger, MIHALY, SCORTEX.

Une mention particulière à 2 de nos membres Optics & Photonics : Mihaly et sa technologie 3D surfacique, scan & impression pour "Libérer la créativité des designers", mais aussi Embodme développant des capteurs pour la reconnaissance du geste sans contact avec l'écran. Bravo à eux !

Quandela lève 50 millions d'euros !

QUANDELA

Quandela obtient 50 millions d'euros pour son expansion internationale et son développement industriel.

"Cette importante augmentation de capital témoigne du formidable potentiel de la technologie quantique de Quandela. Elle nous permettra d'accélérer notre expansion internationale et la production de nos ordinateurs quantiques de pointe. Nous sommes prêts à répondre aux besoins évolutifs de nos clients industriels, à stimuler l'innovation et à façonner l'avenir de l'informatique quantique."

(Source: "Quandela secures €50 million to support international expansion and further industrial development" Press release)

PHOTONHUB DÉMO CENTRE AU SEIN DE L'UTT



Le 5 décembre 2023, un centre de démonstration de PhotonHub Europe sur les "technologies quantiques et la photonique quantique" s'est tenu à l'Université de technologie de Troyes.

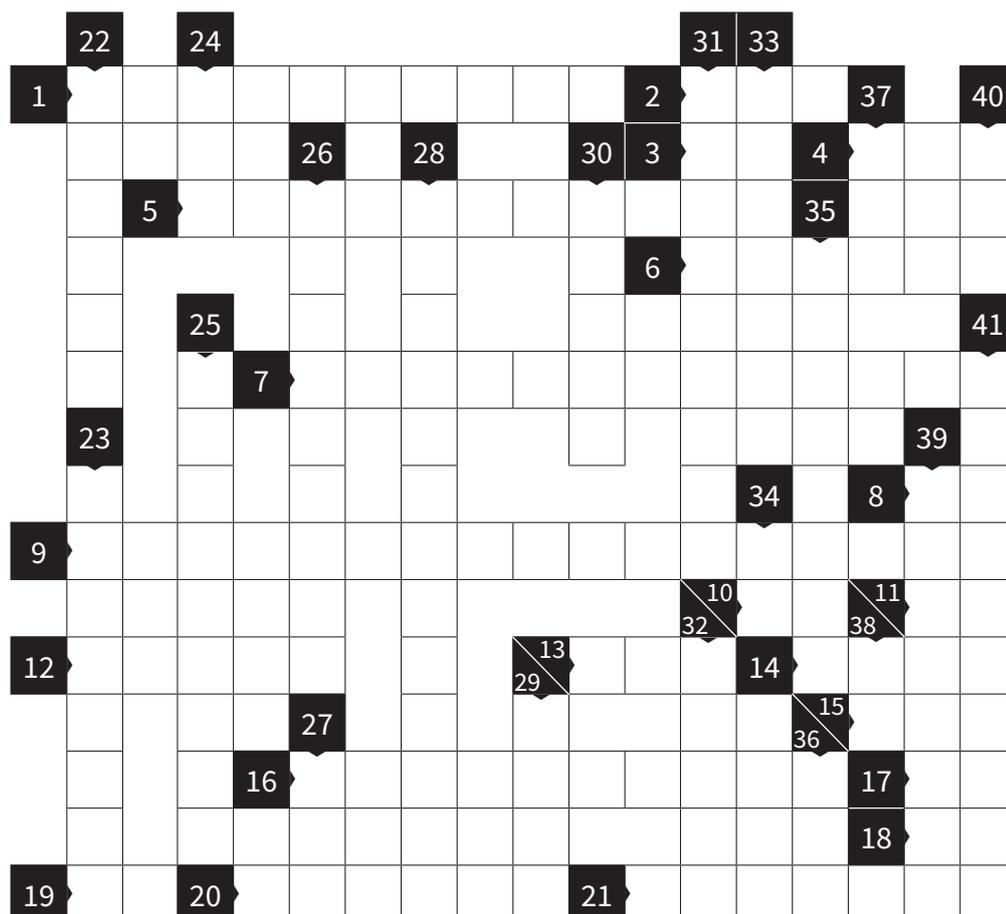
Un sujet important lié au prix Nobel de physique 2022 sur l'intrication quantique et également au prix Nobel de chimie 2023 sur les points quantiques. Ce fut aussi l'occasion d'en savoir plus sur le projet européen PhotonHub Europe.

Pour plus d'informations : https://ecosystem.photonhub.eu/trainings/product/?action=view&id_form=7&id_form_data=39

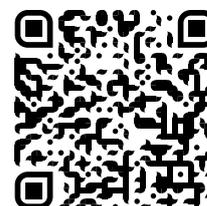
MOTS CROISÉS

SUR LE THÈME OPTIQUE ET SANTÉ

Par Philippe ADAM



SOLUTION SUR
PHOTONIQUES.COM



- | | | | |
|----|---|----|---|
| 1 | Lentille naturelle dans l'œil | 22 | Lentille antérieure de l'œil ; on traite ses aberrations par laser |
| 2 | Tomographie à Cohérence Optique | 23 | Petit nom du médecin qui gère la cataracte (entre autres) |
| 3 | Un dopant des lasers à utilisation clinique | 24 | Imagerie par Résonance Magnétique |
| 4 | Microscope à Force Atomique | 25 | Un tube dans le tube ! |
| 5 | Technique de grossissement, très utilisée en biologie... mais pas que | 26 | Affection épidermique de couleur rose violacée traitée par laser |
| 6 | Peuvent servir, entre autres, de bistouri optique | 27 | Photonique et Sciences du Vivant est un de ses clubs |
| 7 | Traitement de la peau par la lumière | 28 | Union entre microfluidique et optique |
| 8 | La radiographie permet de visualiser leurs atteintes | 29 | Prix Nobel de chimie 2014, inventeur de la microscopie STED |
| 9 | Émission de rayonnement sous excitation photonique | 30 | Affection auditive traitée par laser spécialement chez le chien |
| 10 | Provoque une soif particulièrement intense | 31 | Bonnes pour les chevaux, pas pour les hommes |
| 11 | Rayonnement germicide, mais ne pas en abuser à la plage | 32 | Production d'un cabinet de radiologie |
| 12 | Zone colorée brune sur la peau, traitée par laser | 33 | Centre de Recherche en Epistémologie Appliquée |
| 13 | Détecteur Automatique d'Incendie | 34 | Matériau pour verre utilisé comme filtre optique |
| 14 | Quand un verre de lunette l'est, on ne voit plus rien | 35 | Systèmes d'imagerie, existent en version 2D ou 3D |
| 15 | Ligne d'Intégration Laser, utilisable pour des études médicales | 36 | Extreme Light Infrastructure |
| 16 | Lecture du code génétique | 37 | Émission Spontanée Amplifiée, permet de concevoir des sources pour tomographie |
| 17 | Un des composants atomiques des verres de lunette | 38 | Métal pouvant entrer dans la composition des verres de lunette |
| 18 | Matériau chalcogénure pour l'optique IR | 39 | Il soigne les maladies et imperfections de l'œil |
| 19 | Ouverture numérique | 40 | Image numérique sur votre téléphone et qui peut vous remonter le moral |
| 20 | Relatif à la dépression centrale de la rétine | 41 | La photonique peut permettre de localiser des personnes dans cette fâcheuse situation |
| 21 | Membrane oculaire fragile ; un laser peut la blesser ou la soigner | | |

Source laser à peignes de fréquences triples entièrement fibrée

Une équipe de recherche du PhLAM (Univ. Lille, CNRS) et de l'ONERA Palaiseau vient de réaliser la première démonstration expérimentale d'une source lumineuse à trois peignes de fréquences, entièrement fibrée et agile en fréquence de répétition.

Cette avancée repose sur l'élargissement spectral non linéaire de trois peignes de fréquences produits par des modulateurs électro-optiques dans une fibre tri-cœurs. L'utilisation de la dimension transverse de ces fibres optiques avancées a permis de générer des peignes de fréquences mutuellement cohérents, et ce, automatiquement. Après avoir démontré la stabilité de la source en réalisant des mesures avec deux peignes, l'équipe de recherche a proposé une preuve de concept en spectroscopie multidimensionnelle cohérente à trois peignes, confirmant ainsi l'utilité de cette source pour de telles applications. Ces découvertes ouvrent des perspectives prometteuses en spectroscopie multidimensionnelle cohérente,

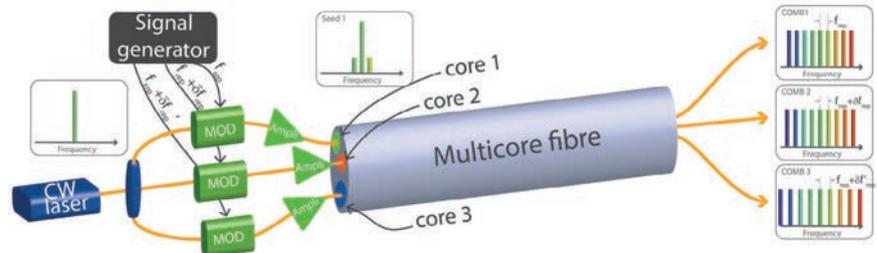


Schéma de la source à triple peignes toute fibrée.

offrant des avantages en termes de rapidité, de précision et de facilité de mise en œuvre. L'équipe envisage d'exploiter cette technologie pour étudier en détail les processus de décohérence dans différents matériaux, allant des quantum

dots aux vapeurs d'atomes chaudes et aux atomes froids. ●

RÉFÉRENCE

E.-L. Bancel, E. Genier, R. Santagata, M. Conforti, A. Kudlinski, G. Bouwmans, O. Vanvincq, D. Labat, A. Cassez et A. Mussot, All-fiber frequency agile triple-frequency comb light source. *Nat Commun* **14**, 7953 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43734-w>

Des nano-piliers qui émergent du saphir

La mise en forme des impulsions laser femtosecondes, au niveau spatial, temporel, et en polarisation a permis des progrès remarquables dans le domaine du traitement des matériaux, permettant une manipulation précise de la matière.

Cependant, jusqu'ici, la plupart des applications laser en termes de modification des matériaux était restreinte à de la nano-texturation en surface ou d'ablation.

Une équipe de l'institut FEMTO-ST (Université de Franche-Comté / CNRS) en collaboration avec le Laboratoire de Géologie de Lyon - Terre, Planètes, Environnement (Université Jean Monnet / CNRS) et le Laboratoire Georges Friedel (Université Jean Monnet, Mines Saint-Etienne) a développé une nouvelle méthode expérimentale pour produire des nano-piliers avec un large volume à la surface du saphir, en un seul tir laser.

Leur approche est basée sur l'utilisation de faisceaux tubulaires, ou faisceaux de Bessel d'ordre supérieur, qui créent une micro-explosion cylindrique au sein du matériau. Selon le régime d'intensité, cette



micro-explosion permet de faire translater un nano-pilier hors du matériau (illustration) voire de créer un nano-jet subissant les instabilités hydrodynamiques, qui se fige pour donner des structures à haut rapport de forme de morphologies variées. Leur diamètre est typiquement de 800 nm pour des hauteurs allant jusqu'à 15 µm.

De façon intéressante, pour le premier régime au moins, les structures sont cristallines. Ces nano-piliers pourront trouver des applications dans le domaine des métamatériaux, ou de la mécanique dans les secteurs de la santé, des capteurs, en photonique ou phononique. D'un point de vue fondamental, ces résultats démontrent également à quel point l'interaction laser-matière peut être confinée à des échelles d'une cinquantaine de nanomètres, même dans des régimes thermodynamiques extrêmes. ●

RÉFÉRENCE

V. V. Belloni, M. Hassan, L. Furfaro, R. Giust, A.-M. Seydoux-Guillaume, S. Sao-Joao, F. Courvoisier, "Single Shot Generation of High-Aspect-Ratio Nano-Rods from Sapphire by Ultrafast First Order Bessel Beam" *Laser & Photonics Reviews* 2300687 (2023). <https://doi.org/10.1002/lpor.202300687>



Entretien avec François Salin

Multi-entrepreneur, président fondateur d'Illasis et président entrant de la SFO.

COMMENT AVEZ-VOUS DÉCOUVERT L'OPTIQUE ET LA PHOTONIQUE ?

J'ai suivi un parcours scolaire classique, avec des classes préparatoire à Bordeaux qui m'ont permis de réussir le concours dans 3 écoles d'ingénieurs. Parmi ces 3 écoles, j'ai choisi l'IOGS, essentiellement pour des raisons géographiques et sentimentales à l'époque. Et ce fut à l'IOGS que je découvris le monde merveilleux de l'optique-photonique. A la sortie de Sup' Op', j'ai fait une thèse au laboratoire Charles Fabry sous la direction d'Alain Brun sur un sujet qui émergeait tout juste mais qui allait guider la suite ma carrière et profondément modifier le paysage de l'optique photonique, celui des lasers femtosecondes. Alain Brun était un électronicien mais il avait senti le potentiel de ces nouvelles impulsions lasers ultracourtes. Le groupe était petit puisque nous étions 2 thésards, le chef de groupe et un technicien, mais nous étions très bien soutenus par la DGA. Ma thèse portait plus précisément sur l'étude des solitons dans les cavités lasers. Mon voisin de bureau était Philippe Grangier qui réalisait sa thèse d'Etat sous la direction d'Alain Aspect. Pour l'anecdote, nous menions nos expériences respectives le soir car les vibrations engendrées par monte-charge du bâtiment du laboratoire Charles Fabry nous empêchaient de les mener en journée. Patrick Georges a également réalisé sa thèse dans ce groupe, il travaillait sur la conception de lasers femtosecondes à partir de sources picosecondes dans le cadre d'une thèse CIFRE avec Photonetics. Hervé Ardit, alors PDG de Photonetics, eut l'idée de nous demander de modifier un laser commercial pour en faire un laser femtoseconde que le fournisseur pourrait vendre. L'entreprise n'a pas cru en ce projet et c'est finalement Photonetics qui l'a mis sur le marché. C'est

Hervé qui m'a montré que, tout en faisant de la science de bon niveau, il était possible d'aller jusqu'à la commercialisation de ces produits de haute technologie.

VOUS ÊTES ENSUITE PARTI AUX ÉTATS-UNIS

Oui, 3 ans après être entré au CNRS, j'ai été contacté par Gérard Mourou qui avait monté son groupe de recherche à l'université du Michigan. Je l'ai rejoint en 1990 en détachement du CNRS. Cette époque correspond à l'émergence de la technologie Titane : Sapphire et les débuts de la technique CPA qui apportera le prix Nobel à Gérard. Je découvre alors dans ce groupe un monde différent et très stimulant, avec une grande mixité entre les académiques et les industriels tout à fait inconnue en France à l'époque.

ET À VOTRE RETOUR EN FRANCE, VOUS DÉCIDEZ RAPIDEMENT DE REJOINDRE BM INDUSTRIE

Je suis revenu à l'IOGS pour travailler en tant de chargé de recherche mais au bout d'un an, j'ai demandé à être, à nouveau, détaché du CNRS pour rejoindre BM Industrie à Evry. BM Industrie était une entreprise créée par Brassard et Michelet, avec une équipe transfuge de Quantel. Ce fut une époque très stimulante car nous avons alors créé les premiers lasers femtosecondes commerciaux. Et grâce au dynamisme de Gilles Riboulet qui a cru à cette technologie, le succès commercial a été au rendez-vous. Mais BMI a alors été revendue à Thales pour devenir Thales Laser. L'intégration a été compliquée pour l'équipe dirigeante de BMI et elle a décidé de quitter Thales pour créer Amplitude. Après 2 ans chez BMI et au moment de la cession à Thales, j'ai mis à profit mon statut de chargé de recherche

et je suis retourné travailler pour le CNRS au LOA. J'ai notamment beaucoup travaillé avec Jean-Paul Chambaret sur la réalisation de sources femtosecondes Sapphire : titane de forte énergie ou de haute cadence (1 kHz à l'époque).

L'IMPLANTATION DU LASER MEGAJOULE EN AQUITAINE MARQUERA UN TOURNANT DANS VOTRE PARCOURS

En effet, en 1996, André Ducasse, alors directeur du CPMOH, me contacte pour me présenter un vaste programme laser sur Bordeaux et ses environs. La décision venait d'être prise dans le cadre du programme de dissuasion nucléaire français, de créer le Laser MégaJoule au CESTA, centre CEA de la région Bordelaise. Un programme civil est lancé en parallèle par la Région et l'Université avec un budget conséquent. La région souhaite alors créer un écosystème régional axé sur les technologies lasers. Après avoir travaillé durant deux ans sur ce projet en étant hébergé par le LOA, j'ai demandé en 1998 au CNRS de me muter à Bordeaux pour y créer le laboratoire CELIA (Centre Lasers Intenses et Applications). Grâce au soutien très fort de la région et de l'université, nous avons pu développer le premier laser Térawatt kilohertz, construire un bâtiment et j'ai créé la PALA, la plate-forme d'applications laser en Aquitaine. Cette plateforme prendra plus tard le statut d'association loi 1901 sous le nom d'ALPHANOV avec le succès qu'on lui connaît aujourd'hui. L'objectif de cette plateforme était de réunir académiques et industriels autour d'une plateforme dédiée aux technologies et procédés lasers. Nous étions installés au démarrage dans la cave de la présidence de l'université. Les entreprises sont venues, les académiques moins. Sur une quinzaine de ●●●

personnes investies à la PALA, nous étions 2 de l'université, Laurent Sarger et moi-même. Plusieurs entreprises ont été créées comme Novalase, etc.

C'EST À CETTE ÉPOQUE QUE VOUS CRÉEZ EOLITE

Avec Jens Limpert, alors post-doc avec moi, nous avons breveté une fibre optique rigide qui permet de concevoir des lasers à fibre notablement plus puissants que les lasers de l'époque. Avec Philippe Métivier, nous avons pris une licence de ce brevet et avons créé EOLITE Systems en 2005. Philippe était Président et moi Directeur Général. Nous nous sommes toujours concertés pour prendre en commun les décisions qui s'imposaient pour l'entreprise et je ne peux que conseiller à tous ceux qui veulent entreprendre de ne pas partir seul. La solitude du dirigeant est une réalité qui conduit trop souvent à la catastrophe. 9 ans après la création de notre entreprise et une belle aventure qui nous a permis de développer et commercialiser toute une gamme de lasers à fibre nanosecondes de très forte puissance pour des applications comme la micro-électronique ou les cellules solaires, un client, ESI Inc., nous a proposé de racheter EOLITE. Après le rachat, mon intégration dans le groupe ESI ne s'est pas très bien passée. Je ne me sentais pas à ma place au sein de cette entreprise et au bout de 18 mois, j'ai pu négocier mon licenciement. Nous sommes alors en 2015 et cette année correspond aussi à la fin de mes 10 ans de détachement au CNRS qui, sans réponse de ma part, me révoque de la fonction publique.

VOUS ALLEZ ALORS REBONDIR EN DÉCOUVRANT LES BESOINS FORTS EN LASERS POUR LA CATARACTE

Oui, tout a débuté lors d'une discussion avec le Pr. David Touboul, un ami de longue date et un de mes anciens étudiants, qui était devenu chirurgien en ophtalmologie et travaillait sur l'opération de la cataracte. Il m'expose les besoins des chirurgiens et en particulier le besoin en lasers simples d'utilisation. J'ai rejoint David et Florent Deloison qui travaillaient alors à Alphanov et nous avons commencé à réfléchir à l'innovation frugale. J'avais rencontré Navi Radjou qui avait écrit le livre remarquable "L'innovation Jugaad : redevenons

ingénieux". En partant de ce concept de frugalité et avec le renfort de Pierre Deslandes, nous avons cherché à concevoir un laser femtoseconde ultra-simple dédié à l'opération de la cataracte. Mais ayant peu d'expérience dans le marché médical, je me suis rapproché d'une vieille connaissance qui était patron de Moria, une entreprise qui développe depuis 1821 des instruments médicaux. Nous avons lancé une boîte qui s'appelle Moria Lase avec le soutien d'un fonds détenu par Edmond de Rothschild. Tout s'est bien passé jusqu'à ce que le fonds qui finançait le projet soit revendu à Bridgepoint, un fonds anglais. Dès son arrivée en 2017, ce fonds Anglo-saxon a modifié toute l'organisation de l'entreprise, renouvelé le management (c'est à dire mis à pieds brutalement le comité de direction dont je faisais partie), coupé les budgets et finalement mis à pieds ou licencié toute l'équipe Moria Lase.

C'EST LE DÉBUT DE L'AVENTURE ILASIS

Avec l'équipe mise à pieds, nous nous sommes retrouvés à Pôle Emploi et aux Prud'hommes, et avons décidé de reprendre en mains ce projet de laser pour la cataracte. Nous avons attendu que la clause de non-concurrence avec Moria expire pour créer en février 2019 l'entreprise Ilasis Laser. Après l'aventure Moria Lase, nous ne souhaitions plus faire affaire avec des fonds anglo-saxons et j'ai approché des business angels – des personnes physiques- qui ont cru dans notre projet et investi dans notre entreprise. Le premier fut l'ancien patron de l'entreprise Ceva Santé Animale qui a investi en plusieurs étapes 2.1 M€ dans Ilasis, suivi par 2 sup'opticiens, Yan Cornil (ami de promo)-LightTec et Gilles Riboulet (ami ex BMI)-Amplitude- et récemment Patrice Houmault –Fizeau. D'autres Business Angels qui nous apportent leur connaissance du monde des affaires même s'ils ne sont pas du domaine du laser ou des dispositifs médicaux, nous accompagnent depuis le début. Ils ont été rejoints par des fonds d'investissement régionaux pour environ 10% du capital. La difficulté du marché médical est qu'il faut obtenir une autorisation de mise sur le marché, ce qui prend plusieurs années et nous vivons donc depuis 2019 grâce aux sommes apportées par nos investisseurs

(et aussi grâce à des aides de la région et des prêts de BPI). Ilasis compte aujourd'hui 20 collaborateurs. Si tout se passe comme prévu, nous devrions doubler ce nombre dans les 24 prochains mois.

QUELLE EST LA TECHNOLOGIE DÉVELOPPÉE POUR CES LASERS ?

Nous avons créé Ilasis sur le concept de l'innovation frugale. Le challenge est le suivant : peut-on développer un laser capable d'effectuer des découpes de l'œil humain avec le minimum de composants et d'énergie ? Rappelons que la cataracte est l'opération la plus répandue dans le monde avec 30 millions d'opérations par an. Le geste chirurgical reste compliqué et les lasers sont d'une grande aide pour cette opération. Nous souhaitons partir du besoin pour développer un laser dédié. Il faut réaliser qu'une opération dure en tout 30 minutes, et que sur ces 30 minutes, le laser ne fonctionne que quelques secondes. L'utilisation de lasers industriels fonctionnant 24H/24H n'est pas adéquate car ces lasers chauffent et nécessitent un refroidissement et doivent être stabilisés. De même, toutes les opérations sont identiques et permettre des réglages d'une opération à l'autre est inutile. Notre objectif a donc été de développer un laser frugal dédié à l'opération de la cataracte. Ce dernier doit délivrer des impulsions courtes de 1 ps et ce, pendant 4 secondes, pour tirer dans un œil avec une liaison souple pour que le médecin puisse le manipuler facilement. Il nous fallait donc un laser à fibre picoseconde suffisamment performant pour réaliser la découpe du cristallin et aussi facile à utiliser qu'un bistouri. Nous sommes revenus à la génération de lasers précédant le CPA (1984) qui s'appelait le TCube, et où l'impulsion picoseconde est injectée dans une fibre pour être élargie spectralement et étirée. Notre laser est un laser picoseconde que l'on comprime et notre savoir-faire consiste à comprendre et à maîtriser les effets non-linéaires dans les fibres. C'est un laser qui ne fonctionne donc que 4 secondes. Après les 4 secondes, il s'arrête. Par contre il ne demande aucun délai de chauffe et il est opérationnel dès la première seconde. C'est la philosophie de l'innovation frugale : faire tout ce qui est nécessaire à l'application mais ne faire que cela. Les fibres sont des fibres monomodes

dopées Ytterbium et nous développons de nouvelles versions de fibres monomodes flexibles à grand mode en collaboration avec Philippe Roy de l'XLIM.

COMMENT S'ORGANISE L'ENTREPRISE ?

Nous sommes 4 cofondateurs. Je suis le plus ancien et avons des expertises variées. Nous avons recruté un expert en business, développement et commercialisation. Il ne faut jamais sous-estimer l'importance du commerce quand on monte des entreprises, c'est un défaut classique en France et il est en général mortel. Des plus jeunes ont depuis rejoint l'entreprise. 5 personnes font de la R&D pour concevoir nos lasers et nos dispositifs optiques, tester et prouver la fiabilité de chacun des composants. Nous accordons une grande importance à la fiabilité de chacun des composants. Nous testons nos produits sur des yeux de cochon qui sont le modèle le plus proche de l'œil humain. Comme nous sommes au début de l'activité commerciale, 5 personnes travaillent actuellement sur la production et nous embauchons des techniciens de production. La vie de l'entreprise est rythmée par les audits pour mettre ces produits sur le marché.

QUELLE EST LA STRATÉGIE DE CROISSANCE D'ILASIS ?

On s'attend à obtenir d'ici la fin de l'année 2023 l'autorisation de mise sur le marché du produit. Nos distributeurs seront nos premiers clients afin de montrer l'intérêt du produit aux médecins. Notre première vente devrait se dérouler en décembre. Nous avons fait des investigations cliniques à la clinique Sourdille-Atlantique de Nantes. Un de nos dispositifs a ainsi été utilisé avec succès par le Dr. Lignereux sur 78 patients. Nous espérons devenir rentables en 2025. Nous avons levé presque 7 M€ de capital en 3 levées successives y compris le financement des fondateurs. Nous sommes soutenus par la BPI (1 M€), la Région (500k€). Nous consommons entre 150k€ et 200k€ par mois pour financer les achats de production et tous les salaires. Comme il y a toujours un décalage entre les achats des composants pour construire nos systèmes et les premiers revenus provenant des ventes, nous programmons une 4^e levée de fond

en 2024 d'un montant compris entre 15 et 20M€. Ceci nous permettra d'amener notre premier produit, Rx, sur le marché américain et une partie de l'Asie. La difficulté est d'obtenir les autorisations zone par zone. Nous souhaitons aussi commercialiser nos lasers dans les pays en voie de développement car la cataracte est la première source de cécité (50% des cas) dans le monde avec près de 20 millions d'aveugles qui seraient immédiatement guéris s'ils pouvaient être opérés de la cataracte. C'est très motivant pour nous ; Nous ne le dirons jamais assez mais si le capital est fondamental pour une entreprise, la motivation des entrepreneurs et des investisseurs n'est pas uniquement financière. Nous avons un 2^e produit en cours de développement sur la myopie. On s'appuie sur un board d'experts scientifiques, dont le prix Nobel Gérard Mourou et 4 médecins, KOL, influenceurs dans le monde médical. Ils nous aident à identifier les besoins. Un exemple de besoin exprimé par nos KOL est d'installer nos lasers sur des roulettes et de les faire fonctionner sur batteries bien plus que d'augmenter leurs performances. Cela peut paraître peu ambitieux et pas très scientifique mais faire tourner un laser femtoseconde de puissance sur batterie demande beaucoup plus de réflexion qu'on ne pourrait croire.

UN MOT POUR LES PLUS JEUNES ?

Il ne faut pas hésiter à tenter des choses. Il n'y a qu'une seule décision que l'on regrette, c'est celle que l'on n'a pas prise. Je suis passé 2 fois par la case chômage. On ne le dit pas assez, mais on a la chance d'avoir en France Pôle Emploi qui nous rémunère pendant 2 ans, ce qui permet de développer des projets. Il faut accepter de sortir du cadre et de sa zone de confort, changer de labos, de domaines... J'aimerais également insister sur l'importance de la frugalité. La nouveauté ne vient pas toujours de ce que l'on rajoute "La perfection est atteinte, non pas lorsqu'il n'y a plus rien à ajouter, mais lorsqu'il n'y a plus rien à retirer. (Antoine de Saint Exupéry)" Intellectuellement, c'est très stimulant et pas forcément évident de retirer le maximum d'éléments tout en conservant les performances indispensables. Cette remarque s'applique dans tous les domaines ! Administratifs, techniques, scientifiques. ●



COATING OPTIQUE LASER

COATINGS LASER pour MIROIR

avec LIDT jusqu'à **50 J/cm²** pour pulse de 10 ns @1µm.

COATINGS ANTI-REFLETS

avec LIDT au delà de **100 J/cm²** & absorption inférieur à **1ppm**.

COATINGS ANTI-REFLETS ULTRA-BAS

Avec une réflectivité inférieur **0.01%** @ 1530-1570 nm ou 1 µm.

Vainqueur du
HiLASE LIDT
Challenge 2023



LIDT **0.6 J/cm²**, AR @ 343 nm
Conditions: 1 ps, 1 kHz, p-pol.

Contactez nous pour discuter de vos futurs projets.

Représentée en France par

ARDOP

INDUSTRIE

05.40.25.05.36

sales@ardop.com

www.ardop.com



Entretien avec Riad Haidar

Directeur scientifique de l'ONERA

COMMENT AVEZ-VOUS DÉCOUVERT L'OPTIQUE ?

C'est une histoire de rencontres, comme pour beaucoup de nos collègues. Au lycée français de Dakar au Sénégal, mon professeur de physique en 1^{ère}, Gabriel Lambert, était un passionné de micro-électronique, et il m'a fait découvrir les triodes, les diodes, les transistors etc., tout ceci par l'expérience. Nous avons même co-écrit un livre sur ce sujet. En classe de terminale, il m'a encouragé à m'inscrire au concours général en physique : cela a été ma première rencontre avec l'optique, puisque le sujet portait sur la notion d'indice de réfraction et l'effet mirage... un sujet inspirant, mais il faut dire que mon prof était fâché avec l'optique et que nous avons fait l'impasse en cours. On peut rêver meilleur contexte pour une rencontre, pourtant j'ai été frappé par la beauté des notions que je découvrais : moi qui m'étais déjà passionné pour l'électronique, j'ai voulu en découvrir plus sur l'optique. Toujours sous la férule de mon professeur, j'ai eu la chance de lire des articles à la frontière entre ces deux sciences, dans un domaine que l'on appelle aujourd'hui l'opto-électronique. J'ai poursuivi mon parcours en classes préparatoires à Paris où un autre professeur, Jean Cox, un féru d'optique m'encourage à intégrer SupOptique, et je découvre alors tout un univers dédié aux sciences de la lumière, avec un niveau scientifique impressionnant, une compétence expérimentale comme on en voit rarement, et des gens passionnés et passionnants.

VOUS DÉCIDEZ ALORS DE POURSUIVRE EN THÈSE DANS LE DOMAINE DE L'OPTIQUE

J'ai tout d'abord eu l'occasion de réaliser un long stage de 9 mois dans le groupe de

Jean-François Roch à l'ENS Cachan sur un sujet à l'interface entre optique et chimie. Et lors d'un séminaire hebdomadaire d'équipe, j'assiste à une présentation invitée d'Emmanuel Rosencher de l'ONERA ; je ne le réalisais pas encore à ce moment-là, mais j'avais en face de moi l'un des auteurs des articles que je lisais à Dakar sur l'opto-électronique... J'ai ensuite effectué mon stage de scientifique du contingent au CEA Saclay dans l'équipe atomes et molécules de Stanislas Pommeret. C'est à ce moment que je vois l'annonce d'une offre de thèse dans le groupe d'Emmanuel Rosencher, sur le développement de sources OPO pour des applications en énergétique et en combustion, et je me suis lancé pour 3 années que j'ai trouvées exceptionnelles...

Par ailleurs, l'enseignement m'intéressait beaucoup et je m'étais d'abord mis en relation avec l'institut d'Optique pour un poste d'ATER après ma thèse. Mais j'ai été contacté par Jérôme Primot pour un poste d'ingénieur-chercheur dans son équipe au département d'optique de l'ONERA : il m'a expliqué que je pourrai aussi assumer une charge d'enseignement, en parallèle d'une activité de recherche ; c'était inespéré !

COMMENT AVEZ-VOUS IDENTIFIÉ LA NANOPHOTONIQUE COMME UNE TECHNOLOGIE CLÉ POUR LES BESOINS DE L'ONERA ?

L'ONERA est un organisme public, en charge des activités de recherches en aérospatial civil et de défense. Pour les finalités du secteur, il était apparu un besoin fort pour des capteurs et des instruments optiques compacts, qui puissent intégrer et combiner plusieurs fonctionnalités, comme par exemple l'imagerie et la spectrométrie. La compacité permettait, outre de garantir l'embarquabilité sur porteur, de réduire le

coût et la consommation. Pour répondre à ce cahier des charges, nous avons identifié la nanophotonique comme une thématique et une technologie à fort potentiel. Bien qu'encore peu répandue au début des années 2000, cette science était en plein essor dans un certain nombre de laboratoires académiques en France.

Sous l'impulsion d'Emmanuel Rosencher (alors directeur scientifique de l'ONERA) et de Jean-Yves Marzin (directeur du laboratoire de photonique et des nanostructures, le LPN), je noue une collaboration avec l'équipe de Jean-Luc Pelouard, qui se cristallise au bout de quelques années en un laboratoire commun, MINAO. Dans la décennie qui a suivi, les projets se sont enchaînés, dans un contexte de rare effervescence scientifique : ils ont mené à de nombreuses réalisations de tout premier plan, attiré plusieurs jeunes collègues et étudiants brillants, et permis de former de nombreux docteurs... À tout point de vue, cela a été une aventure formidable, aussi bien humaine que scientifique et j'éprouve beaucoup de gratitude pour mes collègues du LPN et de l'ONERA qui l'ont rendue possible, et pour les étudiants qui nous ont fait confiance et qui nous ont rejoints.

QUELS SONT LES SUJETS QUE VOUS AVEZ EXPLORÉS ENSEMBLE ?

Dans le contexte d'une recherche fondamentale à finalités, nous avons identifié un certain nombre de dispositifs à développer, et donc de concepts : sources thermiques de lumière, ainsi que des capteurs et composants optiques, exploitant le rayonnement thermique, les effets d'optique non linéaire, ou encore les métasurfaces pour coder la polarisation, la phase et le spectre d'un front d'onde... Nous avons conçu, fabriqué

et caractérisé plusieurs familles de filtres spectraux, avec des assemblages métal-diélectrique-métal nanostructurés, verticaux et horizontaux, dont les fameux résonateurs de Helmholtz. En exploitant l'équivalence entre émission et absorption, nous avons développé des détecteurs et des sources de lumière. L'équipe a exploré les limites du spectre infra-rouge, notamment dans le THz où nous avons utilisé les concepts d'antennes optiques pour transformer des imageurs thermiques infrarouges en imageurs THz. Au final, je me suis pleinement investi sur ces domaines de recherche entre 2003 et 2016. Ces années furent très riches, et nous avons monté 2 laboratoires à l'ONERA sur ces sujets.

J'ai ensuite pris la responsabilité du domaine scientifique de la physique à l'ONERA, un poste que j'ai occupé pendant 5 années, avant d'être nommé en 2021 à la

direction scientifique générale de l'ONERA, dont les activités de recherche sont réparties sur tout le territoire, en PACA, Occitanie, Hauts de France et Ile de France.

EN PARALLÈLE À CES ACTIVITÉS DE RECHERCHE, VOUS VOUS ÊTES TOUJOURS BEAUCOUP INVESTI DANS L'ENSEIGNEMENT.

Un de mes moteurs personnels est d'être un passeur de savoir. Ceci d'abord pour la raison (évidente) que l'on participe ainsi à une sorte de relais planétaire et à travers le temps, un relais dont l'objectif est la transmission des connaissances – et qui sait les merveilles qu'inventeront demain ceux et celles que l'on forme aujourd'hui ? Et aussi parce qu'endosser ce rôle de « passeur » oblige à aller aux fondamentaux et à acquérir une compréhension profonde des concepts que l'on transmet. J'ai donc

toujours cherché à enseigner, déjà depuis l'école, puis durant ma thèse : j'ai effectué des vacances en DESS à l'université d'Evry. Puis, comme ingénieur-chercheur à l'ONERA, j'ai enseigné à l'IOGS et à l'Ecole Polytechnique. J'ai eu l'honneur d'être recruté en 2010 sur un poste de Professeur chargé de cours à l'École polytechnique, et j'y enseigne, toujours avec un grand plaisir, les beautés et la puissance de l'opto-électronique.

VOUS VOUS ÊTES ÉGALEMENT BEAUCOUP IMPLIQUÉ DANS LA SFO ET SA REVUE PHOTONIQUES.

Encore une fois, c'est une histoire de rencontres. La première est avec la revue : étudiant en thèse, j'ai été parrainé pour rejoindre la SFO, et j'ai commencé à recevoir (et à dévorer) Photoniques. Je me souviens en particulier du choc lorsque,

COMSOL

Améliorez la conception de vos optiques

avec COMSOL Multiphysics®

La simulation multiphysique est un vecteur d'innovation pour les technologies et produits en optique. La possibilité de construire des modèles complets et réalistes permet de simuler précisément les systèmes optiques et aide les ingénieurs à comprendre, prévoir et optimiser les performances des systèmes.



» comsol.fr/feature/optics-innovation

pour la première fois, j'ai reçu un exemplaire d'une autre revue, Photonik, la jumelle allemande de notre revue française, dont un numéro avait une ambition (j'allais dire une vocation) européenne : traduit en anglais, ce numéro était envoyé à tous les membres de l'EOS. C'était une initiative géniale... mais elle n'a duré que quelques années.

La seconde rencontre est avec Joël Deschamps, un collègue de l'ONERA, qui était membre du comité de rédaction de la revue, qui souhaitait passer le relais et qui cherchait un successeur. Il me parraine auprès de la rédactrice en chef, Françoise Métivier, qui accepte. Je suis passionné d'écriture depuis l'enfance, et je lui suggère presque immédiatement d'écrire une biographie sur Augustin Fresnel pour la revue. L'article est publié et les retours sont bons. Je suggère alors une seconde biographie et ainsi naquit la rubrique 'Les opticiens célèbres'. Après le départ de Françoise Métivier quelques années plus tard, qui a été remplacée un temps par Véronique Parasote, le comité de rédaction se cherche un nouveau rédacteur en chef. Costel Subran, membre historique du comité de rédaction, me propose le poste. C'était pour moi une occasion inespérée d'associer science et écriture ; et puis j'avais également l'envie de poursuivre l'aventure qu'avait entreprise Photonik : donner à la revue une dimension européenne, et offrir à l'Europe une revue comme Photoniques. La fabrication du premier numéro européen a été épique, à de nombreux égards, bien sûr... Mais je suis tellement fier des deux éditions que Photoniques diffuse au sein de l'EOS chaque année. Bravo à toute l'équipe !

EN 2019, VOUS ÊTES NOMMÉ DIRECTEUR GÉNÉRAL ADJOINT À L'ENSEIGNEMENT DE L'IOGS

Je l'ai dit, l'enseignement a toujours été une composante importante de mon activité et de mes motivations. Avoir la possibilité de m'investir pour l'Ecole qui m'avait formé, et de structurer la formation d'une institution comme l'IOGS était une opportunité enthousiasmante, et que je ne pouvais pas ne pas saisir. Après en avoir discuté avec Jean-Louis Martin, son Directeur Général, je n'ai pas hésité, en tout cas pas longtemps.

J'ai, là aussi, entre autres actions, voulu renforcer la dimension européenne de l'École par des partenariats avec des grands établissements européens, des doubles diplômes, des enseignements en anglais, une meilleure visibilité de l'offre de formation, la création d'une collection de monographies IOGS etc.

Je me suis investi dans cette mission pendant 3 années, avant de passer la main en 2022 à Raphaël Clerc : je venais en effet d'être nommé au poste de Directeur scientifique général de l'ONERA, avec une charge associée incompatible avec celle de Directeur d'Ecole. À l'ONERA, nos activités de recherche impliquent près de 1500 chercheuses et chercheurs sur tout le territoire, et recouvrent 5 domaines scientifiques : la physique, les matériaux et les structures, la mécanique des fluides et l'énergétique, le traitement de l'information et les systèmes, et la simulation numérique avancée. C'est très varié et très vaste, et j'aime à penser que, d'une certaine manière, ma culture, ma formation et mon parcours en optique à la frontière de la chimie, de l'électronique et des matériaux, m'avaient, au moins un peu, préparé à la transversalité de cette mission. Une chose est sûre : les interactions avec les collègues sont inspirantes, les travaux et les ambitions sont du meilleur niveau, et les défis ne manquent pas car on compte sur nous pour construire l'avenir de l'aérospatial : quel challenge et quelle motivation !

QUELS RÔLES JOUENT L'OPTIQUE ET LA PHOTONIQUE DANS LES ACTIVITÉS DE RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT DE L'ONERA ?

Les challenges et les enjeux de l'aéronautique et de l'aérospatial soulèvent un certain nombre de questions fondamentales ; pour plusieurs d'entre elles, les sciences de la lumière peuvent apporter des solutions concrètes ou conceptuelles, et proposer des pistes pour avancer. Il est remarquable, et je peux en témoigner, que dans chacun des domaines scientifiques de l'ONERA la lumière joue un rôle important, que ce soit comme objet d'étude en soi dans nos travaux en optique quantique, en optique adaptative ou en nanophotonique ; comme outil pour d'autres sciences, pour la métrologie

des écoulements, pour l'analyse d'une chambre de combustion, pour l'aide au pilotage, ou pour la connaissance de l'environnement ; comme vecteur de technologie, pour la fabrication additive, pour les télécommunications, pour le contrôle non destructif des matériaux et structures, ou demain pour le calcul hautes performances... Pour concevoir des avions plus « verts », plus communicants ou plus sûrs, la photonique a un rôle à jouer.

QUELLES SONT LES ACTIVITÉS À VENIR DANS LESQUELLES VOUS SOUHAITEZ VOUS IMPLIQUER ?

Sur un plan personnel, mes envies n'ont pas changé : enseigner, écrire et participer à l'effort scientifique ; même si, sur ce dernier point, mon activité propre de recherche s'est considérablement réduite, et que j'ai irrémédiablement basculé dans le management au service de la recherche, que ce soit des collègues qui me sont directement rattachés ou des scientifiques dont j'oriente les travaux. Je continue naturellement de suivre de près les activités de la SFO et de nos grandes institutions de l'optique (en particulier, l'IOGS, Photonics France ou l'EOS), en France et avec l'Europe, et je suis ravi d'apporter mon aide en tant que de besoin. Ce serait formidable que l'exemple de la revue Photoniques inspire d'autres revues nationales, et que chacune prenne à tour de rôle l'initiative d'un exemplaire « européen ». J'ai aussi un attachement et un intérêt particuliers pour les actions du club Optique sans frontières, qui cherche à élargir les horizons et à s'associer aux pays africains et d'Amérique du Sud : il me semble que nous pourrions en faire davantage, et qu'il y a encore une marge de progrès dans nos organisations collectives.

Enfin, si vous me permettez de sortir du cercle strict de l'optique et des sciences de la lumière, j'aimerais dire un mot sur l'intérêt du doctorat pour nos entreprises : le potentiel de cette formation reste largement sous-estimé en France, contrairement à plusieurs pays européens. Il y a sans doute matière à fédérer les énergies et les bonnes volontés pour faire progresser cette perception, et à l'ONERA nous sommes volontaires pour prendre notre part de l'effort collégial. ●

Lannion : du berceau des télécoms à une place forte de la photonique



Si le Trégor et la ville de Lannion sont aujourd'hui une des références mondiales dans le domaine de la photonique, c'est grâce à l'implantation du Centre National des Télécommunications (CNET) au tout début des années 1960. La décision de l'installation de ce centre de recherche est fortement appuyée par Pierre Marzin, originaire de Lannion. Cet événement marque un vrai tournant pour le développement futur du tissu industriel de Lannion ! Retour sur une épopée industrielle unique portée par des hommes et des femmes déterminés et visionnaires.

<https://doi.org/10.1051/photon/202312321>

Agnès GAUTRET^{1,*}, Patrice LE BOUDEC^{1,2}, Dominique BOSCH¹, David MECHIN¹

¹ Photonics Bretagne, Lannion, France

² IDIL Fibres Optiques, Lannion, France

*agautret@photonics-bretagne.com

Décentralisation du CNET à Lannion, sous l'impulsion de Pierre Marzin

À la Libération, la France est un pays ruiné. La création du CNET, le Centre National d'Etudes des Télécommunications, le 4 mai 1944 à Issy-les-Moulineaux, représente un grand espoir de redressement pour le secteur des télécommunications. En 1955, un comité interministériel propose de décentraliser certaines administrations pour créer de l'emploi dans les régions. Le cas du CNET, à l'étroit dans ses locaux, est évoqué. Alors directeur de l'établissement depuis 1953, Pierre Marzin est le principal décideur du nouveau lieu et de la nature des activités à délocaliser. Une alternative s'offre à lui : la région de Grenoble ou celle de Lannion, dont il est originaire. C'est naturellement vers cette dernière que son choix se tourne, avec l'appui de personnalités comme René Pléven, président du Comité d'études et de liaison des intérêts bretons (Célib), ancien président du Conseil des Ministres et président du Conseil général des Côtes-du-Nord.

La ville a pour avantage de n'avoir aucun obstacle pouvant perturber la propagation des ondes et bénéficie d'un aéroport construit par les Allemands durant la Seconde Guerre mondiale. Situé à quelques mètres des terrains envisagés pour l'installation du CNET, il représente un argument essentiel pour des transports rapides de personnes et de matériel, facilitant ainsi les liaisons avec Paris. Pierre Marzin confirme : « *Nous sommes dans une période où les télécommunications et l'électronique progressent à pas de géant et constituent un des facteurs essentiels du progrès social et économique. La région lannionnaise convient bien au projet.* » On parle d'une première tranche : un laboratoire de 500 chercheurs. Le centre est donc implanté à Lannion en 1960.

Tandis que Pierre Marzin siège à Paris, c'est Louis-Joseph Libois qui est nommé directeur du CNET de Lannion, en raison du transfert de son équipe du département RME (Recherches sur les Machines Électroniques, créé en 1957). Les recherches menées à Lannion concernent l'électronique de très basse température, les lasers, les transmissions par guide d'ondes circulaires et surtout la commutation électronique et la transmission par impulsions codées.

Industrialisation rapide

La réussite de cette transplantation, dans une région où l'absence de matières premières rentables interdisait toute industrie lourde, contribue à la "vocation" électronique de la Bretagne. Elle entre dans l'ère des télécommunications avec la naissance d'une mono industrie qui se fait principalement entre 1962 et 1968 : la Socotel, SLE-Citerel, LMT-Thomson, LTT et d'autres usines privées s'implantent elles aussi à Lannion, le CEMS à Pleumeur-Bodou, la CSF à Brest et la SGS à Rennes. En effet, parallèlement à l'aménagement progressif de la zone de Lannion, dix kilomètres plus loin, est construit le Centre de télécommunications spatiales de Pleumeur-Bodou (le Radôme). Dans la nuit du 10 au 11 juillet 1962, les signaux émis par la station jumelle d'Andover aux Etats-Unis, relayés par le satellite Telstar 1, sont reçus à Pleumeur-Bodou et permettent pour la première fois une transmission d'image télévisée intercontinentale par satellite. Cette première mondiale est consacrée par la visite du général de Gaulle le 19 octobre 1962. Le CNET, bien souvent à la pointe de l'innovation en matière de télécommunications, prend alors durablement une place de premier rang dans les programmes spatiaux européens et internationaux. Le bâtiment du CNET de Lannion est, quant à lui, officiellement inauguré l'année suivante, le 28 octobre 1963 par Jacques Marette, Ministre des PTT : « Lannion sera l'un des plus grands centres du monde et nos premiers balbutiements dans l'électronique seront désormais historiques. Comme l'on parle aujourd'hui d'Edison, on parlera demain du CNET de Lannion ».

En 1966, le Centre de Météorologie Spatiale (CMS) rejoint les installations et des services suivent : formation des personnels, gestion des pensions des PTT, précoces décentralisations tertiaires. Combinant recherche et production, Lannion accueille des unités de fabrication (lignes téléphoniques, câbles, matériel de commutation) et devient la capitale bretonne de l'électronique et des télécommunications, avec 5000 emplois directs dans un rayon de 8 km autour du CNET et de l'aéroport. Dans les usines, on ne cesse de recruter, notamment des femmes, couturières pour la majorité. Habiles de leurs mains, elles peuvent manier les minuscules composants. En quelques

années, Lannion voit sa population doubler, passer de 9 000 à plus de 20 000 habitants. On dit alors que c'est la ville de France qui compte le plus de neurones au m².

Développement des technologies photoniques : premiers travaux

Les années 70 voient les prémices des recherches sur l'optique au centre du CNET à Lannion. Loin de Paris et de leur hiérarchie, les ingénieurs du CNET se sentent libres d'essayer, d'oser.

Les premières fibres optiques sont tirées dans cette décennie en commençant par les fibres à saut d'indice puis très vite les fibres multimodes à gradient d'indice dites 50/125 (diamètre du cœur sur diamètre de la fibre) et les fibres monomodes. Les techniques de l'époque sont peu différentes de ce que l'on connaît maintenant et la venue de l'optique dans les télécommunications suscite beaucoup de sujets d'études : on peut par exemple noter l'expérimentation des liaisons optiques en espace libre dans la région de Lannion.

Alors que le marché des télécommunications est dominé par les Américains en 1970, les chercheurs du CNET se mettent au défi de travailler sur l'appareil de commutation téléphonique, non pas de demain, mais d'après-après-demain. Les chercheurs imaginent utiliser des composants électroniques pour remplacer l'électromécanique des standards téléphoniques. Eureka ! Le projet "Platon", prototype lannionnais d'autocommutateur temporel à organisation numérique, aboutit et permet à Alcatel – anciennement SLE (Société Lannionnaise d'Electronique) – de devenir un leader mondial des télécommunications grâce à sa production et commercialisation.

Le CNET révolutionne les technologies de l'information, avec l'invention en 1977 du Télétexte, service d'information sur les téléviseurs, et surtout du Minitel en 1980. Le CNET innove également en optoélectronique et le projet "Clématite" fondé sur l'élaboration d'une technologie originale d'écrans à cristaux liquides à matrice active est développé de 1984 à 1986, et récompensé en 1987. Cette innovation, élaborée à l'origine pour les Minitels, ouvre des perspectives pour les ordinateurs

Vue d'ensemble des premières installations du Radôme (néologisme associant radar et dôme) à Pleumeur-Bodou. Assemblé et gonflé en 8 mois, il protège une antenne mobile destinée à capter les émissions de télévision en provenance des Etats-Unis via satellite. Le 19 octobre 1962, le Général de Gaulle vient visiter le CNET et le Radôme. Il est reçu par Pierre Marzin, directeur du CNET et par Henri Blandin, maire de Lannion.



portables et écrans de télévision, et confère dès lors au CNET une position pionnière sur le marché mondial.

Parallèlement, la réorganisation du CNET de 1979 a structuré la recherche sur les transmissions optiques en les confiant au centre CNET-LAB (Lannion B) d'environ 750 personnes. Séparés en deux divisions, ROC et MER, dont la première est entièrement dédiée à l'optique, une dizaine de départements de vingt à trente personnes devient impliqué dans la recherche photonique, avec plusieurs expérimentations telles que le « *Projet Monomode* » (à 1,55µm) sur les réseaux optiques du futur, ou encore l'invention d'une source laser accordable sur une large plage de longueurs d'onde.

Durant environ 10 ans, ils développent quasiment tout le spectre des composants optiques nécessaires à la transmission sur fibre :

- Les technologies optoélectroniques pour les composants comme les lasers à multi-puits quantiques, les polymères conducteurs, l'épitaixie sur InP, etc.
- Les nouveaux procédés de fabrication de fibres notamment par dépôt plasma, la connectique pour fibre, la structure de câbles optiques, les premières fibres en polymère pour la distribution optique dans le visible, les fibres en verres fluorés pour le moyen infrarouge, etc.
- Les amplificateurs optiques à semi-conducteurs et sur fibres (silice et verres fluorés), la stabilisation des sources laser, le multiplexage en longueur d'onde, les photodétecteurs, les diodes laser, les effets non linéaires sur fibres, l'aiguillage optique et même la commutation tout optique, etc.
- Les techniques de transmissions optiques numériques, les techniques de traitement du signal pour les systèmes de transmission à détection cohérente, etc.

Nombre de ces études sont réalisées en associant des industriels par des marchés d'études ou des Groupements d'Intérêt Economique afin de favoriser leur transfert industriel et donner lieu à de nombreux brevets.

Des formations pour les futurs ingénieurs et techniciens

Le 7 octobre 1985, le Président de la République François Mitterrand annonce la création d'une école d'ingénieurs ainsi que l'octroi d'une aide de 10 millions de francs pour le Trégor et des primes à l'aménagement du territoire. L'ENSSAT – École nationale supérieure de sciences appliquées et de technologie – voit donc le jour en 1986 et héberge le Centre régional d'innovation et de transfert technologique, association financée dans le cadre du contrat de plan État-région pour la mise au point de spécifications techniques. Dans le même temps, en face du centre de recherche, s'implante un IUT d'électronique.

En formant des ingénieurs en optronique et des techniciens en électronique, directement au contact du CNET et des entreprises privées, l'objectif est de développer un vivier de futurs salariés pour les industries locales.



Lumibird, le spécialiste des technologies laser

Lumibird, groupe français dont le siège social est à Lannion, est un des plus grands spécialistes mondiaux du laser. Fort de plus de 50 années d'expérience et maîtrisant les technologies des **lasers à solides**, des **diodes laser** et des **lasers à fibres**, Lumibird conçoit, fabrique et distribue des lasers haute performance, à usages scientifique (laboratoires de recherche, universités), industriel (production, défense, spatial, capteurs LiDAR) et médical (ophtalmologie, diagnostic échographique). En 2023, dans le cadre de sa stratégie de verticalisation et de souveraineté sur les technologies laser en Europe, Lumibird a finalisé l'acquisition de Convergent Photonics, filiale de la société Prima Industrie. Cette acquisition présente un double intérêt stratégique pour le Groupe, d'une part en renforçant son autonomie sur les semi-conducteurs et les lasers à fibre de haute puissance, et d'autre part en ouvrant de nouveaux segments de marché.



Elle complète également avec l'arrivée du semi-conducteur, les investissements stratégiques déjà réalisés sur la fibre optique et sur les composants dérivés, tels que la construction d'une tour de fibrage à Lannion et l'acquisition de Innoptics en 2022.

Le dynamisme du Groupe se reflète aussi dans les nouveaux produits mis sur le marché en 2023 :

Le « *Shrike* », un laser YAG pompé par diodes, ultra-compact et robuste, le « *Merion HP* », un laser impulsif haute puissance moyenne, le « *Peacock XT* », nouvel oscillateur paramétrique optique nanoseconde, le « *Firecrest* », un émetteur laser de grande portée pour la télémétrie, et des amplificateurs à fibre de 40 W pour les applications de télécommunications spatiales.

Le Groupe, coté en bourse, est présent en Europe, en Amérique et en Asie, à travers ses 13 sites de production et de R&D, et ses bureaux de vente et de support. Lumibird emploie aujourd'hui plus de 1000 personnes. ●

CONTACT

Mélanie Leseignoux / EMEA Sales Director
contact@lumibird.com - 01 69 29 17 00
www.lumibird.com

Succession de crises et essaimages : constitution d'un tissu unique de PME

Au milieu des années 1980, une première crise éclate : certains industriels sous-traitants d'Alcatel se retrouvent dans une situation critique, étant davantage considérés comme des unités de production externalisées sans pouvoir de négociation, ni autonomie commerciale. Cela engendre de nombreux licenciements, voire des fermetures définitives.

Les pouvoirs publics locaux, les industriels privés et le CNET ont alors pour objectif de transformer le pôle innovant de Lannion en un tissu économique local innovant de PME dans l'optronique pour préserver l'emploi et même susciter des créations dans des secteurs d'avenir. Plusieurs dispositifs d'aide à la création d'entreprise sont mis en place dont le projet CELTT, en avril 1985, qui vise à favoriser la création d'entreprises à fort contenu technologique à partir des centres d'enseignement et de recherches. L'ADIT - Agence de développement industriel du Trégor - à la base pépinière d'entreprises, apporte surtout son soutien aux essaimages des ingénieurs du CNET et d'Alcatel. Les entreprises Novatech, à Ploumilliau, et PECCI, à Perros-Guirec, en sont de parfaits exemples.

Les années 90 sont ensuite marquées par la diversification des services et l'arrivée de la concurrence. Après être devenu le leader mondial des équipements de télécommunications, le groupe Alcatel-Alsthom connaît plusieurs années de sévère concurrence de la part d'Ericsson, Motorola et Lucent Technologies. La suppression de plus de 1000 emplois dans l'usine CIT-Alcatel en 1996 provoque une mobilisation sans précédent de la population : en novembre, 20 000 personnes manifestent dans les rues de Lannion.

Par ailleurs, le CNET effectue une mutation majeure en devenant le centre de recherche de l'entreprise France Télécom, dont le capital est ouvert. Sa privatisation partielle en 1997 change la donne. Elle est provoquée par une évolution internationale des opérateurs de réseaux télécoms, qui sont le plus souvent des services publics détenteurs d'un monopole depuis le début du 20^{ème} siècle. Cela impacte directement le CNET-LAB avec l'arrêt progressif de toutes les études sur les composants optiques et en partie celles sur les réseaux.

Cependant, un essaimage important est généré par cette situation avec la création d'entreprises de chercheurs du CNET-Lannion ou de doctorants en relation avec le CNET et l'ENSSAT. On

Inauguration du Photonics Park le 7 juillet 2017.



Vue aérienne d'une partie de l'écosystème photonique lannionnais, situé en bord de mer sur la côte de granit rose, en Bretagne.

peut ainsi relever notamment la création d'Algéty, d'Idil Fibres optiques, d'Optocom Innovation rapidement renommée Keopsys et d'Highwave Optical Technologies. D'autres personnes du CNET Lannion, issues ou proches de l'optique, se sont tournées vers la recherche publique et l'enseignement supérieur à Lannion, mais aussi à Rennes, à Brest et à Nantes.

Cette fois-ci, les PME ne sont pas de simples entreprises sous-traitantes mais disposent d'une réelle autonomie qui leur permet de valoriser les compétences locales en technologies et en main-d'œuvre, et de rechercher de nouveaux marchés sur le plan mondial. Dans cette phase d'expansion, petites et grandes entreprises trouvent d'excellentes conditions d'implantation : ingénieurs et techniciens formés localement, main-d'œuvre qualifiée, réseau de communication performant...

Néanmoins, une nouvelle crise en 2001 fait resurgir les craintes des licenciements massifs des années 1980. L'optique étant le segment le plus touché, tous ces sociétés sont atteintes de plein fouet ; en deux ans, près de 2000 emplois sont supprimés à Lannion.

De PERFOS au Photonics Park

Faisant suite à la crise des télécoms, une nouvelle stratégie territoriale qui vise à développer la filière photonique à Lannion est instaurée. L'association loi 1901 PERFOS (Plateforme d'Etudes et de Recherches sur les Fibres Optiques Spéciales) est fondée en 2003 afin de pérenniser les technologies de fabrication de fibres spéciales développées précédemment au sein de Highwave Optical Technologies. L'objectif est également de mutualiser les outils technologiques à destination de l'écosystème local.

La filière photonique trégorroise est alors portée par la technopole Anticipa (anciennement l'ADIT) mais il n'existe aucun vrai pôle photonique en Bretagne, contrairement aux autres régions françaises qui constituent pourtant un écosystème moins riche ! Fort de ce constat, l'association PERFOS devient Photonics Bretagne en 2011 après avoir obtenu le label « grappe d'entreprises » et regroupe désormais un cluster et une plateforme technologique.

À l'image des « Science Parks » américains, est construit puis inauguré en 2017 le Photonics Park. Il regroupe un hôtel d'entreprises, une plateforme technologique, et un incubateur de

start-ups et PME, avec en son cœur Photonics Bretagne, sa tour de fibrage de 13m de haut et des équipements de dernière génération. Représentant un investissement de 5M€, ce projet est rendu possible grâce au soutien financier des pouvoirs publics et collectivités : l'Union Européenne (FEDER), l'Etat, le Conseil Régional de Bretagne, le Conseil Départemental des Côtes d'Armor et Lannion-Trégor Communauté. Cela a permis à Lannion, et plus largement à la Bretagne, de s'imposer comme un pôle d'innovation national et européen de la photonique.

Trégor-Valley : reconnue pour ses innovations sur le plan mondial

Avec l'une des plus importantes concentrations d'Europe d'entreprises photoniques et de tours de fibrage – Photonics Bretagne, Exail, et Lumibird –, Lannion abrite une filière photonique stratégique pour la souveraineté nationale et européenne. Le Photonics Park, qui s'étend aujourd'hui à l'ensemble de l'écosystème photonique lannionnais, est une place forte de la photonique dans le monde, sur toute la chaîne de valeur, de la R&D à la fabrication : du micro-perçage à l'étirage de fibre optique, jusqu'à leur intégration dans des sous-systèmes tels que les capteurs ou les lasers. Avec une croissance moyenne de 15% par an, la vingtaine d'entreprises du Photonics Park, grands groupes et PME spécialisées (Orange, Lumibird, Exail, Ekinops, Cristalens Industries, EXFO, Idea Optical – Groupe Acome, Kerdry – Groupe HEF, IDIL Fibres Optiques, Oxxius, BKtel Photonics...), ainsi qu'un laboratoire de recherche CNRS (Institut FOTON), emploient plus de 1000 personnes (+120% en 10 ans) et ont réalisé 420M€ de chiffre d'affaires en 2022 dont 55% à l'export.

Les perspectives de développement sont importantes pour ces 10 prochaines années. Les entreprises locales étant positionnées sur des marchés porteurs d'envergure internationale, on ambitionne la création de plus de 1000 emplois supplémentaires. Le territoire, par le biais du Campus des Métiers et des Qualifications d'Excellence Numérique, Photonique et Cybersécurité, mène d'ailleurs des opérations de séduction pour susciter des vocations dès la 3ème en leur permettant d'effectuer des stages de découverte de la photonique. Une offre pédagogique complète (Lycée Felix Le Dantec, IUT et ENSSAT) est également proposée à plus de 2500 apprenants, du bac professionnel au doctorat, mais aussi aux demandeurs d'emplois et salariés souhaitant évoluer, grâce à la formation continue (Photonics Bretagne). Cela permet de répondre aux besoins en recrutement des entreprises locales pour tous les métiers de la photonique : opérateur, technicien, ingénieur, chercheur.

Avec une culture de l'innovation depuis plus de 60 ans, Lannion est résolument un territoire singulier, souvent qualifié de « Mini Silicon Valley » ou « Trégor Valley », grâce à sa forte concentration technologique au m² et son cadre de vie exceptionnel sur la côte de Granit Rose. Cet écosystème photonique unique en France (entreprises-formations-recherche) offre de multiples innovations pour les télécoms, la défense, le spatial, l'aéronautique, le médical, et contribue ainsi au plan Deeptech de France 2030. ●

SURFACE MATERIALS SCIENCE FROM SUBSTRATE TO THIN FILMS

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

| 2 countries | 8 industrial plants | 237 employees

Our expertise:

- Glass cutting
- Chemical glass treatment
- Custom optical coatings
- Optical treatments and precision engraving
- Flat polishing expertise
- Thermal CVD coating

Let's discuss
together about your
project:

SPIE. PHOTONICS
WEST

Booth n°1266

La réalité virtuelle au service de l'apprentissage en photonique

Ludovic LESCHIEUX

ALPhANOV, 33400 Talence

ludovic.lescieux@alphanov.com



Si vous n'avez jamais essayé la réalité virtuelle, faites-le ! Cette première expérience est généralement incroyable et les personnes qui font ce premier pas en ressortent impressionnées. Mais au-delà de cet effet « waouh » lors d'une première découverte, quels sont les avantages à utiliser la réalité virtuelle pour la formation ? Pour quels enseignements et comment s'assurer de l'efficacité des apprentissages ?

<https://doi.org/10.1051/phonon/202312326>

Depuis plus de sept ans, le centre de formation PYLA, spécialisé dans la mise en œuvre de formations professionnelles en optique et laser, développe des modules de travaux pratiques en réalité virtuelle. L'objectif ? Développer le savoir-faire autour des gestes techniques et procéduraux grâce à un laboratoire d'optique virtuel. La maîtrise de ces apprentissages est fondamentale en photonique et indispensable en entreprise. Cette méthode, qui repose sur des outils numériques immersifs, facilite la mise en pratique en situation réelle.

La réalité virtuelle au service des apprentissages procéduraux

Le développement d'un outil de réalité virtuelle pour la formation nécessite plusieurs années. PYLA

a fait le choix d'intégrer toutes les compétences au sein de son équipe : développement informatique, graphisme et ingénierie en pédagogie digitale. Au-delà d'une expérience nouvelle et innovante, la réalité virtuelle a un réel intérêt pour l'acquisition des gestes procéduraux et techniques que l'apprenant va répéter grâce à l'outil. Dans notre cas, il s'agit par exemple de développer de la technicité pour aligner un laser, manipuler des faisceaux en sécurité ou réaliser des montages optiques plus ou moins complexes. Il est ainsi possible de mettre en œuvre des scénarios d'apprentissage qui permettent de développer des

compétences progressivement et en autonomie. Lors du passage en situation réelle, l'apprenant maîtrisant désormais une procédure, peut alors se concentrer sur d'autres aspects, comme la sécurité laser, la fragilité des composants ou la compréhension des phénomènes physiques. La réalité virtuelle permet également d'embarquer de la réalité augmentée pour aider l'utilisateur à comprendre des concepts physiques. Dans le module « Collimation laser », les foyers images et objets des lentilles sont ainsi représentés sur le parcours du faisceau laser (figure 2). Dans le module « Interféromètre de Michelson »,

Au-delà d'une expérience nouvelle et innovante, la réalité virtuelle a un réel intérêt pour l'acquisition des gestes procéduraux et techniques que l'apprenant va répéter grâce à l'outil.

ce sont les différences de chemin optique entre les miroirs qui sont mises en évidence. Enfin, l'utilisation de cette technologie présente de nombreux autres avantages, comme celui de pouvoir utiliser du matériel habituellement inaccessible car coûteux ou sensible, ou celui de pouvoir manipuler en dehors des salles de travaux pratiques.

Les étapes de construction d'un module de réalité virtuelle

La première étape dans la construction d'un module consiste à embarquer la physique de l'optique dans un casque de réalité virtuelle du commerce. Pas si simple, quand on pense que les casques autonomes actuels (c'est-à-dire les casques qui ne sont pas reliés à un ordinateur) ont une puissance de calcul équivalente à celle d'un smartphone. Certes, les technologies sont de plus en plus performantes, néanmoins quand il s'agit d'afficher une quantité importante de rayons ou bien de calculer le résultat d'une figure d'interférence, l'outil peut rapidement se trouver

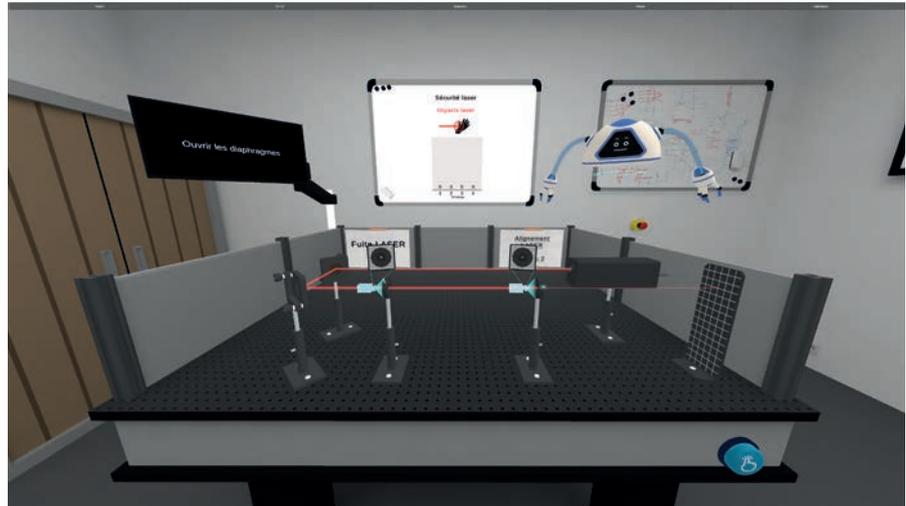


Figure 1. Le laboratoire d'optique virtuel permet de réaliser des travaux pratiques en autonomie. Ici l'apprenant réalise un apprentissage d'alignement laser.

limité. Toute la difficulté consiste donc à trouver des astuces et des compromis pour utiliser au mieux les performances de l'outil. On va donc s'adonner à rendre un comportement physique suffisamment réaliste pour satisfaire l'apprentissage, sans pour autant chercher à développer un outil de simulation optique à proprement parlé. Pour se faire, nos développeurs doivent bien évidemment comprendre les phénomènes optiques,

les mathématiques associées et les traduire dans le code de programmation pour un résultat optimisé.

Une fois la physique implémentée, il s'agit alors de pouvoir représenter l'ensemble de l'environnement, des objets et des interactions, grâce au code de programmation et au talent d'un graphiste, le tout en utilisant les mêmes outils de développement qui sont utilisés pour les jeux vidéo.

SPECTROGON

State of the art products

Filtres Interférentiels

De 200 à 15000 nm

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

Réseaux Holographiques

De 150 à 2000 nm

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

UK (parle français): sales.uk@spectrogon.com • Tel +44 1592770000

Sweden (headquarters): sales.se@spectrogon.com • Tel +46 86382800

US: sales.us@spectrogon.com • Tel +1 9733311191

www.spectrogon.com

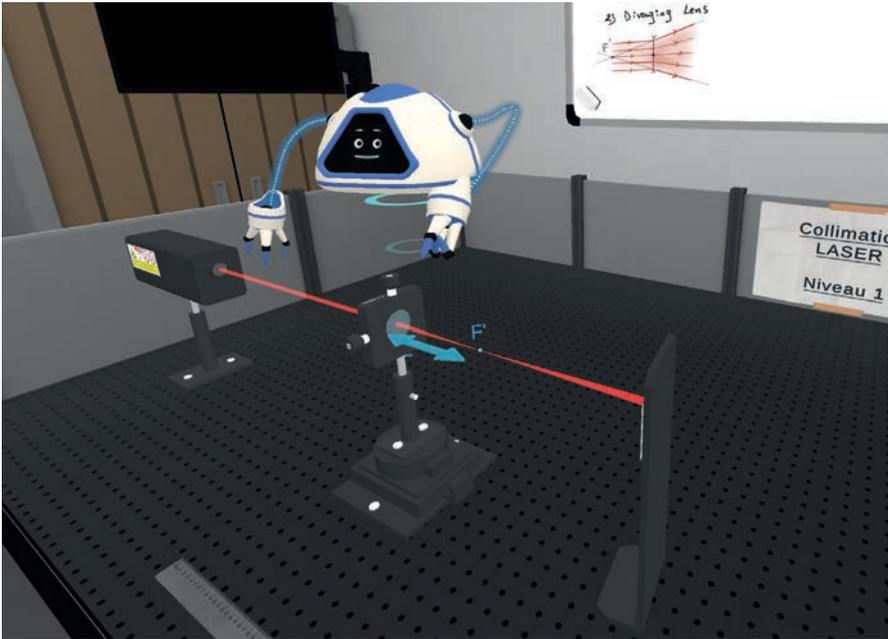


Figure 2. Dans le module d'apprentissage « Collimation laser » - les foyers des lentilles sont représentés dans la réalité virtuelle.

La construction d'un scénario pédagogique est tout aussi difficile que la première étape. Enseignants-chercheurs, formateurs en photonique, ingénieurs pédagogiques et didacticienne des sciences sont en renfort pour cette étape cruciale. Comment former en autonomie et s'assurer de l'efficacité d'un apprentissage ? A qui s'adresse le module et vers quels objectifs pédagogiques souhaitons-nous emmener l'apprenant ? Autant de questions qu'il ne faut pas négliger pour éviter les étapes inutiles, et risquer ainsi la surcharge cognitive ou le décrochage de l'apprenant. La prise en compte des prérequis est ainsi essentielle et une question permanente anime nos experts : le scénario pédagogique envisagé favorise-t-il bien un transfert de compétences efficace ? Au cours de cette étape, différents niveaux pédagogiques sont construits, eux-mêmes découpés en étapes. Pour optimiser l'autonomie de l'apprenant, c'est un avatar qui fait office de professeur virtuel et l'accompagne pas à pas, en français ou en anglais (figure 3).

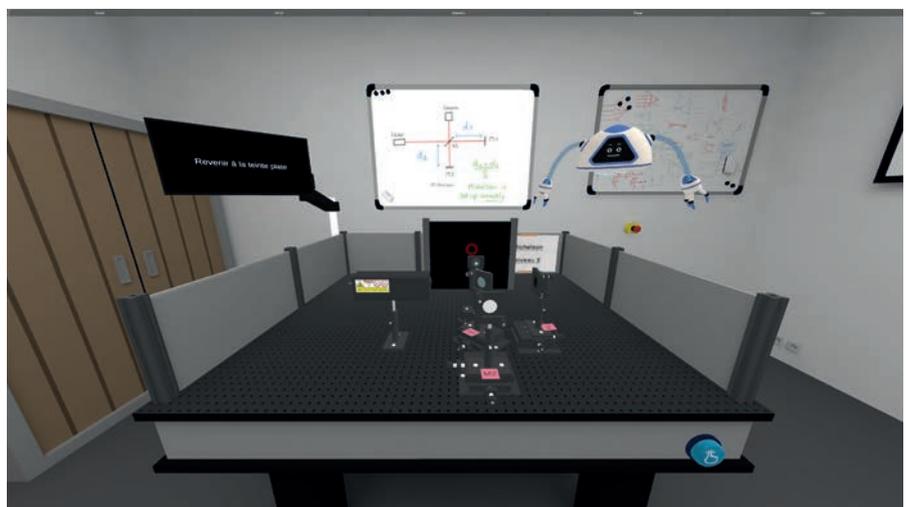
Une fois le scénario établi, vient l'heure des tests sur les utilisateurs cibles. Nous regardons et corrigeons les problèmes techniques bien sûr, mais nous prenons surtout en compte les retours d'utilisateurs que ce soit sur la compréhension des consignes, la fluidité du module ou bien les difficultés rencontrées.

Comment intégrer la réalité virtuelle dans un enseignement ?

L'intégration d'un module de réalité virtuelle au cours d'une session de travaux pratiques doit prendre en compte des contraintes comme l'acceptabilité de l'outil par les utilisateurs que ce soient les enseignants ou bien les étudiants, la formation à l'utilisation de ces outils, les contraintes environnementales ou encore le temps d'utilisation. Les enseignants utilisant actuellement ces modules nous font remonter différents cas d'usages possibles. Certains laissent les casques en libre accès aux étudiants de façon à préparer une session de TP à venir, d'autres utilisent la réalité virtuelle comme un poste TP supplémentaire, en parallèle des postes classiques, permettant aux étudiants d'effectuer des rotations.

Le centre de formation PYLA intègre également la réalité virtuelle, par exemple dans ses sessions de formation d'opérateurs de production laser ou la formation en sécurité optique. Elle permet d'appréhender plus efficacement les manipulations en optique avant d'effectuer un cas pratique similaire en situation réelle.

Figure 3. L'avatar « robot » explique étape par étape comment régler l'interféromètre de Michelson.



UN PROJET COLLABORATIF POUR DES OUTILS NUMÉRIQUES EFFICACES, LAURÉAT DE L'APPEL À PROJETS DEFFINUM

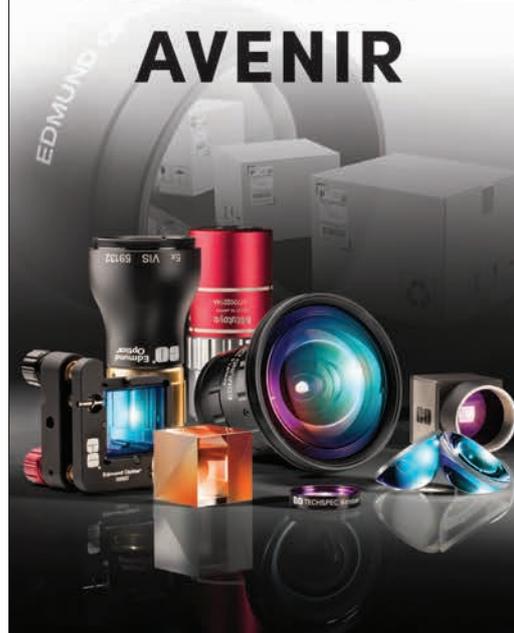
Le projet PhOENIX (Photonique, Outils Educatifs Numériques Intelligents et eXpérimentés) est un projet interdisciplinaire porté par ALPhANOV et qui réunit PYLA, le CATIE - Centre Aquitain des Technologies de l'Information et Électroniques et PHOTONICS France autour d'un objectif commun : développer les outils numériques pour la formation en photonique.

Face à une filière en forte croissance, les acteurs de la formation en photonique doivent en effet adapter dès aujourd'hui les parcours pédagogiques et optimiser les formats d'apprentissages pour répondre à l'urgence de former ces candidats en un temps record. Les nouveaux outils pédagogiques numériques comme la réalité virtuelle, la pédagogie adaptative ou le micro-learning apparaissent comme des solutions de choix pour former un public hétérogène, tant dans ses qualifications initiales que dans ses possibilités matérielles de formation. Cependant, les travaux de recherche en éducation et en ergonomie montrent que nombre de ces nouveaux dispositifs pédagogiques numériques sont malheureusement contre-productifs car ils n'ont pas été conçus en intégrant des tests avec une communauté d'utilisateurs (conception centrée utilisateur), ni en s'appuyant sur une méthodologie pédagogique ou didactique. L'ambition de ce projet est donc double. Il s'agit d'une part de produire des outils qui permettent de faciliter et d'amplifier la formation pour la filière photonique et d'autre part de produire des connaissances méthodologiques et des outils facilitant la conception d'innovations pédagogiques numériques efficaces.

Lauréat de l'appel à projets DEFFINUM (Dispositifs France Formation Innovante NUMérique), lancé par le ministère du Travail, du Plein emploi et de l'Insertion dans le cadre d'un vaste plan de transformation et de digitalisation de la formation intégré au Plan de relance, co-piloté par le Secrétariat général pour l'investissement (SGPI), et opéré par la Banque des territoires dans le cadre de France 2030, le projet Phoenix vise à fournir à la filière photonique et au monde de la formation professionnelle :

- des outils et modules d'apprentissage numériques qui auront été optimisés pour les besoins de la filière de formation en photonique (travaux pratiques, concepts physiques, mathématiques pour la physique),
- un livre blanc synthétisant les bonnes pratiques pour concevoir des outils pédagogiques numériques pour la formation professionnelle,
- des méthodologies et des outils pour simplifier la conception et l'évaluation de solutions numériques et pédagogiques, via la plateforme d'évaluation et d'analyse cognitive et comportementale de l'humain PEAC²H,
- un accompagnement des formateurs pour qu'ils puissent utiliser de manière vraiment efficace les outils pédagogiques numériques développés dans ce projet.

L'OPTIQUE EST NOTRE AVENIR



Edmund Optics®

**Le guichet unique
pour vos besoins en
optiques !**

- Un large choix de plus de 34.000 produits en stock
- De nouveaux produits ajoutés en permanence
- Des produits de haute précision et de qualité pour vos besoins en optique, imagerie et photonique
- Une équipe d'assistance technique à votre disposition pour toutes vos questions

Découvrez notre boutique
en ligne dès maintenant !

www.
edmundoptics
.fr



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

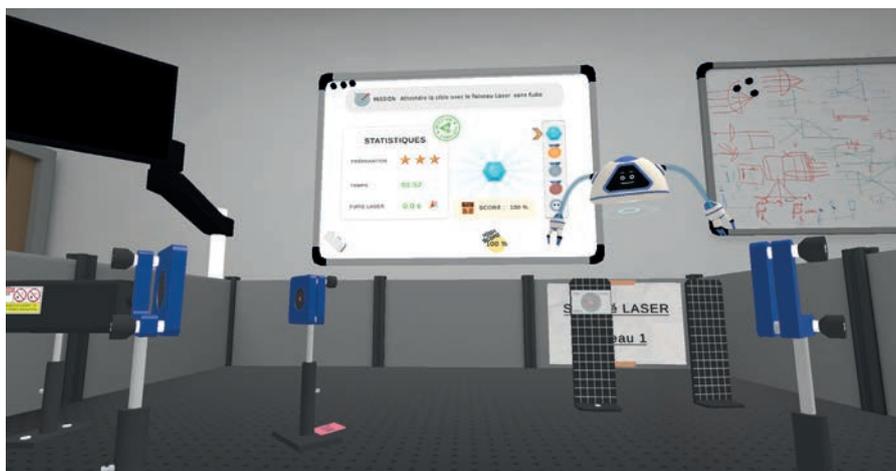


Figure 4. Le module « Sécurité laser – Transport de faisceau », débute par un défi où l'apprenant doit réaliser un montage sans fuite laser et à l'issue duquel il obtient un score. Cette ludification permet de mieux engager l'utilisateur dans l'apprentissage. A la suite de ce challenge, il apprend étape par étape les bons gestes pour manipuler en sécurité.

À destination des entreprises

La formation initiale n'est pas la seule cible de ces solutions de réalité virtuelle, les entreprises sont aussi concernées par ces nouveaux outils pour leurs collaborateurs. Par exemple, le module de manipulation d'un faisceau laser en sécurité est particulièrement utile pour développer et maintenir les bonnes pratiques dans ce domaine. Que ce soit pour la sensibilisation à la sécurité de nouveaux arrivants ou pour le recyclage des connaissances des collaborateurs, ce module suivi en autonomie et sur un temps court permet un apprentissage ou une remise à niveau efficace sur ces sujets.

Dans ce module, l'apprenant débute par un défi où il doit réaliser un montage simple avec trois miroirs pour transporter un faisceau laser sur une cible, sans réaliser de fuite laser. Cette première étape, réalisée sans instruction, permet de faire un état des lieux des habitudes et de la pratique de l'apprenant en lui attribuant un score (figure 4). Cette ludification de l'exercice favorise notamment l'engagement de l'utilisateur et améliore l'attractivité. À la

suite de quoi, un professeur virtuel (le robot) explique étape par étape les bonnes pratiques permettant à l'apprenant de mettre en œuvre les bons gestes. Enfin, une fois l'apprentissage réalisé, une possibilité est offerte de rejouer le défi initial ce qui augmente généralement significativement le score de l'apprenant.

Dans un souci de formation « étape par étape », les premiers niveaux sont réalisés avec un laser visible et des miroirs dont la hauteur ou l'axe de rotation ne peuvent être changés. Ce n'est qu'après le troisième niveau que l'apprenant réalise le montage avec un laser invisible, une carte infrarouge et

tous les degrés de liberté possibles sur les différents axes du miroir. De quoi être prêt à affronter la réalité d'une manipulation.

Au-delà de ce module d'apprentissage, la réalité virtuelle est utile pour former des collaborateurs sans interrompre une ligne de production ou bien lorsqu'un matériel est peu accessible. Il n'y a pas d'immobilisation de matériel ni même de personnels. Des modules sur l'alignement d'un compresseur optique ou l'alignement d'une parabole utiles aux grandes installations de haute puissance laser ont par exemple été développés dans cet objectif.

Conclusion

Bien conçue et bien utilisée, la réalité virtuelle offre de nouvelles opportunités d'apprentissage en complément des enseignements traditionnels. Elle permet notamment de faciliter le développement de compétences procédurales et de mieux comprendre les phénomènes optiques en rendant visible l'invisible. Il est néanmoins important d'accompagner les utilisateurs, que ce soient les enseignants, les formateurs ou les apprenants eux-mêmes, pour un bon usage de cet outil. Soigner l'ingénierie de conception pédagogique en prenant en compte les contraintes environnementales, humaines et cognitives est particulièrement important pour s'assurer de l'efficacité de l'apprentissage réalisé. ●

RÉFÉRENCE

[1] A. Caussarieu, J. Bribet, J.-C. Delagnes, L. Dutertre, B. Fabre, L. Lescieux, R. Mrabet and E. Cormier, TP3.0: how can virtual reality enrich practical teaching? <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=etop-2021-Th1A.3>

Remerciements

- CATIE – Centre Aquitain des Technologies de l'Information et Electroniques
- Photonics France
- Caisse des dépôts – Banque des territoires
- France 2030
- NextGeneration EU
- République Française
- Enseignants-chercheurs de l'Université de Bordeaux :
Éric Cormier, Baptiste Fabre et Jean-Christophe Delagnes
- Aude Caussarieu



DE LA TOMOGRAPHIE OPTIQUE PAR COHÉRENCE PLEIN CHAMP (FFOCT) À LA TOMOGRAPHIE OPTIQUE PAR TRANSMISSION PLEIN CHAMP (FFOTT)

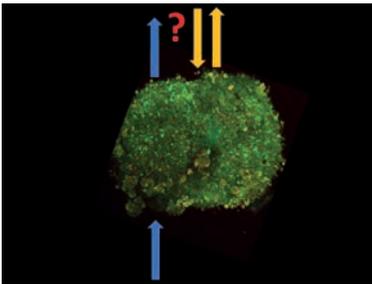
Viacheslav MAZLIN¹, Samer ALHADDAD¹, Martine BOCCARA², Thomas MALDINEY³, Olivier TOUVENIN¹ et Claude BOCCARA^{1,*}

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

² ISYEB, Muséum National d'Histoire Naturelle, Sorbonne Université, 57 rue Cuvier, 75005 Paris

³ Service de Réanimation - Surveillance Continue, Centre Hospitalier William Morey, 4 rue Capitaine Drillien, 71100 Chalon-sur-Saône

*claud.boccara@espci.fr



La tomographie par cohérence optique ou OCT a révolutionné le diagnostic oculaire. Nous avons proposé une variante de l'OCT, dite « plein champ » (FFOCT) dont les principales applications se sont situées en cancérologie ex et in vivo. Nous souhaitons ici introduire une nouvelle méthode de tomographie plein champ par transmission (FFOTT) et comparer les avantages et inconvénients des deux méthodes.

<https://doi.org/10.1051/photon/202312331>

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.

PRINCIPE ET MONTAGE DE FFOCT ET FFOTT

La tomographie optique cohérente est une technique interférométrique mise au point en 1991 et qui a eu un impact majeur dans l'imagerie de l'œil en permettant l'observation des couches cellulaires de la rétine en coupe virtuelle (voir l'article publié dans Photoniques N95, [1]). Après plus de vingt ans d'utilisation de cette méthode de tomographie optique pour laquelle le « sectionnement optique » est obtenu par l'utilisation d'interférences avec des sources à spectres larges, nous avons récemment proposé une nouvelle méthode de tomographie optique par

transmission basée sur l'utilisation de la phase de Gouy.

Un montage permettant l'observation du même plan de sectionnement optique par les deux méthodes est représenté sur la figure 1. En suivant les chemins de la lumière nous nous proposons de décrire les deux méthodes que nous illustrerons par la suite.

Le but des deux méthodes de tomographie que nous décrivons ici est d'observer des échantillons dont les microstructures diffusent la lumière, comme les organelles des cellules, ou les fibres de collagène des tissus biologiques.

FFOCT est une technique interférométrique dans laquelle la lumière

rérodiffusée par l'échantillon diffusant interfère avec le faisceau de référence réfléchi par un miroir (encadrement bleu de la figure 1). D'un autre côté, FFOTT est aussi une approche interférométrique opérant par transmission et utilisant un chemin optique commun : le faisceau lumineux incident se propage, en effet, le long du même chemin que le faisceau diffusé par l'échantillon (encadrement rouge de la figure 1). Bien que se propageant le long du même chemin, le faisceau d'éclairage et le faisceau échantillon interfèrent avec un déphasage qui varie entre $-\pi/2$ et $\pi/2$ autour du foyer de l'objectif de microscope sur une distance sensiblement égale à la profondeur ●●●

de champ de l'objectif du microscope et qui se nomme déphasage de Gouy.

Nous sommes tous familiers de l'utilisation l'interféromètre de Michelson et de sa variante Linnik (avec un objectif dans chacun des bras) que l'on voit sur la figure 1, dans ce cas le « sectionnement » optique dans le milieu diffusant et la sélection des photons balistiques rétrodiffusés (ceux qui ont échappé à la diffusion) sont en général imposés par la longueur de cohérence temporelle de la source (liée à sa largeur spectrale). Mais nous utilisons aussi des sources incohérentes spatialement comme les LEDs qui sont peu bruyantes et permettent une détection, avec des caméras, limitée par le bruit shot avec un rapport signal sur bruit de la centaine de dB pour une mesure moyennée sur une seconde (2).

Sans doute sommes-nous moins familiers de « la phase de Gouy » découverte par ce très talentueux physicien lyonnais il y a plus d'un siècle. Le déphasage de Gouy est un déphasage de π qui se produit lorsqu'une onde convergente passe par son centre, il s'agit d'une propriété générale de toutes les ondes (électromagnétiques, acoustiques, etc.). Le déphasage de π est associé à une structure d'onde à 3 dimensions (comme celle d'une onde optique issue d'un objectif de microscope) et il est différent ($\pi/2$) pour une onde à 2 dimensions (comme une onde acoustique issue d'une barrette ultrasonore).

Pour se donner une idée de la PSF axiale que l'on obtient en FFOTT, nous utilisons l'approximation gaussienne du faisceau issu de la diffusion de la lumière par une particule afin de disposer d'une expression analytique simple (3) : un objet de très petite taille éclairé par une onde incidente diffuse une onde quasi-sphérique dont l'ouverture angulaire est limitée par celle de l'objectif de microscope. Les ondes incidentes et diffusées interfèrent, et sur la caméra on observe alors une image limitée par la diffraction avec une intensité plus faible ou plus forte que le fond

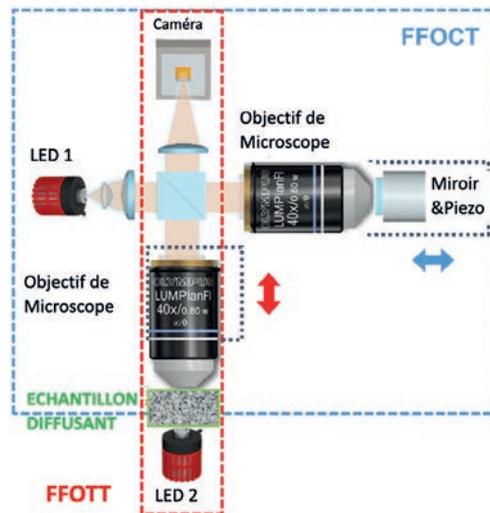


Figure 1. Montage permettant l'observation d'une même "tranche" d'un échantillon diffusant par FFOCT (encadrement bleu) et FFOTT (encadrement rouge). Figure adaptée de la référence (3).

selon que l'objet se trouve avant ou après le foyer (interférence constructive ou destructive).

MÉRITES ET LIMITES DE FFOCT ET FFOTT

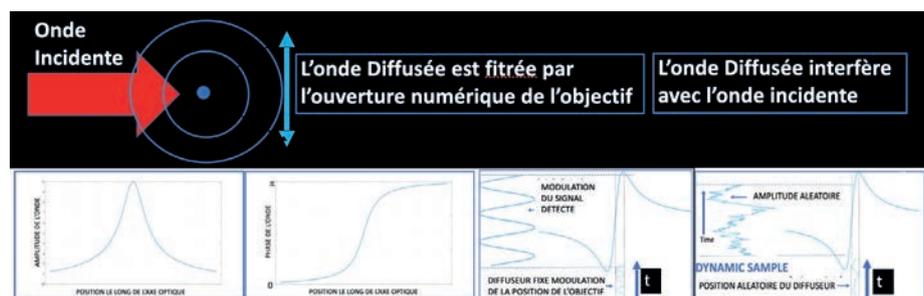
On peut voir sur la figure 1 à quel point le montage de FFOTT est simple, cependant la première limite qu'il est aisé de se représenter est que, à la différence de FFOCT qui utilise un faisceau de référence qui n'a pas été dégradé au cours de sa propagation, FFOTT utilise un faisceau de référence qui sera perturbé par la

traversée de l'échantillon (aberrations, diffusion). Pour un échantillon dont l'épaisseur est supérieure à la longueur de transport, longueur au bout de laquelle les photons incidents ont perdu la direction de leur vecteur d'onde initiale (typiquement 1 mm dans les tissus biologiques), la perte de cohérence spatiale annihilera le signal d'interférence. FFOCT sera donc principalement limité aux échantillons optiquement peu épais ou transparents.

Les points qui sont, par contre, à l'avantage de l'OTT se trouvent dans le niveau des signaux détectés. En effet les objets qui diffusent la lumière, dès qu'ils possèdent une taille supérieure au quart de la longueur d'onde λ de l'éclairage, le font préférentiellement vers l'avant : par exemple pour un objet de taille $\lambda/2$ un calcul de diffusion de Mie montre que la section efficace de diffusion est mille fois plus grande vers l'avant (ici transmission) que vers l'arrière (rétrodiffusion).

Le choix de l'ouverture numérique d'éclairage (ON_e) en transmission est aussi critique : si l'échantillon est constitué de structures de tailles $\ll \lambda$, les angles de diffusion couvriront l' ON_o de l'objectif quel que soit ON_e et on atteindra la résolution, donc la profondeur de champ de l'objectif. Si la diffusion est très anisotrope, il faudra augmenter ON_e sans toutefois atteindre ON_o , ce qui risquerait de trop réduire la cohérence spatiale (Théorème de Van Cittert Zernike).

Figure 2. La partie supérieure de la figure schématise le principe de l'OTT. En dessous les images représentent, autour du foyer, l'amplitude du champ diffusé (A), sa phase (B), la forme du signal d'interférence pour une modulation périodique (C) ou aléatoire (D) de la distance particule/ objectif.



GUIDES DE LUMIÈRE
EN FIBRE DE VERRE

Reprise de l'activité

Corning SAS



FIBRES SOUPLES

Embouts spécifiques
compatibles aux
systèmes d'éclairage



BARREAUX RIGIDES

Transmission lumineuse exceptionnelle
ON > 0,37



CONÇUS À FAÇON

ULTRA RÉSISTANTS

- + Autoclave, substances chimiques
- + Analyse médicale
- + Pièces à mains dentaires
- + Aéronautique
- + Contrôle de processus
- + Mesures industrielles
- + Détection
- + Industrie nucléaire

info@idil.fr

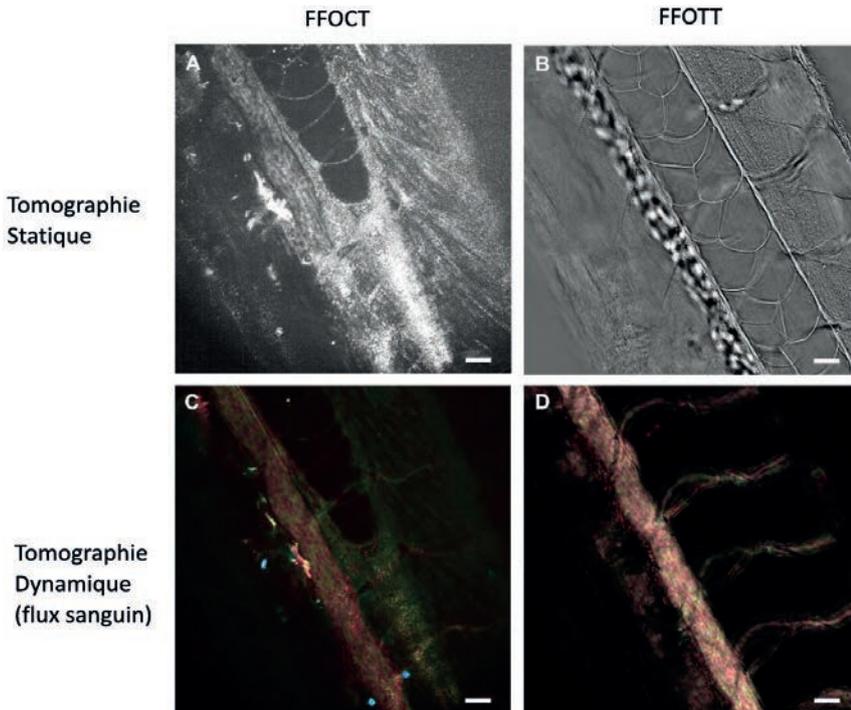


Figure 3. Tomographie statique et dynamique du flux sanguin en FFOCT et OTT chez l'embryon de poisson zèbre. Barres d'échelle : 20 µm. Figure adaptée de la référence (4).

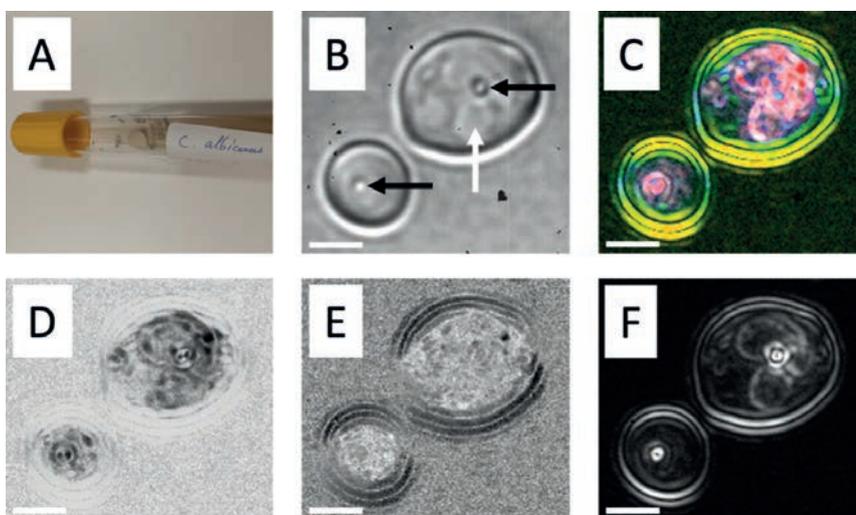
DOMAINES APPLICATIFS

Domaine biomédical

A l'aide du montage de la figure 1 nous pouvons comparer les images des mêmes

champs obtenus par FFOCT et FFOTT. Les résultats obtenus sur l'embryon de poisson zèbre sont représentés sur la figure 3. Ces dernières années, ●●●

Figure 4. FFOTT encytologie dynamique en mycologie médicale. A : Vue macroscopique d'une culture solide de *Candida albicans*. B : FFOTT statique de *Candida albicans* (100×). C : Examen direct obtenu en FFOTT dynamique (100×). D : Composante moyenne du signal obtenu en FFOTT dynamique et largeur spectrale associés et F : Composante liée à la variation d'amplitude du signal obtenu en OTT dynamique (100×). Barre d'échelle = 3 µm. Les flèches noires pointent le noyau des levures, la flèche blanche pointe les vacuoles des levures.



les embryons de poisson zèbre ont été utilisés comme modèles pour le développement précoce de nouveaux médicaments dans les domaines de la toxicologie, du cancer, de la génomique humaine, de la biologie du développement et pour d'autres recherches du domaine biomédical.

Sur ces images plusieurs points sont à noter ; si on peut distinguer des structures identiques sans ambiguïté d'autres semblent se présenter de façon très différentes. Faute d'une biopsie de la zone observée nous nous limiterons à souligner que les images FFOTT ne présentent pas le niveau de speckle élevé des images FFOCT. Cela est dû au fait que la phase de Gouy varie de π dans la zone sectionnée alors qu'en FFOCT cette zone comprend plusieurs longueurs d'onde donc plusieurs fois 2π .

Plus près de l'hôpital et des maladies fongiques, la figure 4 présente un exemple d'application de FFOTT pour la réalisation d'un examen de cytologie dynamique en mycologie médicale avec l'observation d'une suspension de levures obtenue à partir d'une culture solide de *Candida albicans* (A). La Figure B présente l'image obtenue par FFOTT standard au grandissement maximal (100X), confirmant la visualisation aisée des différentes structures d'intérêt et caractéristiques de la morphologie de ce type de levures (noyaux pointés par les flèches noires, vacuole pointée par la flèche blanche, membrane délimitant les contours de chaque cellule fongique). L'image obtenue en FFOTT dynamique est présentée en C, avec ses différentes composantes (fréquence centrale, largeur spectrale, amplitude de variation :D-E). Elle confirme l'intérêt du signal dynamique pour une analyse comparée des différents compartiments de *Candida albicans*, avec des signaux très différents entre la membrane (signal jaune / vert), les vacuoles et le noyau (signal rose / violet) de chaque cellule fongique, témoignant de possibles activités métaboliques très différentes.

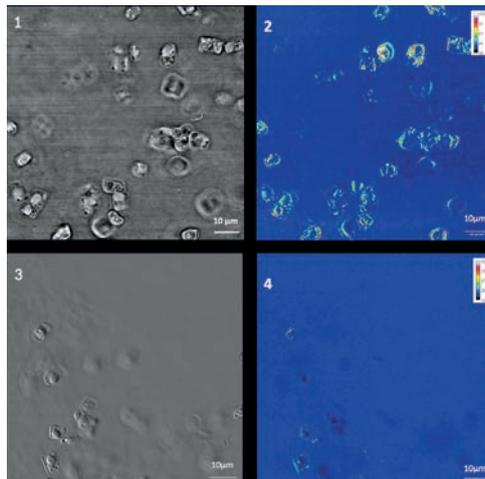


Figure 5. FFOTT de l'algue *Fragilariopsis* en différentes conditions d'éclairage tomographie statique (1) et dynamique (2) à la lumière et après deux mois d'obscurité (3 et 4). (collaboration Nathalie Joli).

Ces résultats permettent d'envisager des applications potentielles en mycologie médicale, aussi plus largement en microbiologie médicale, pour la réalisation d'examens de cytologies dynamiques ultra-rapide, avec l'idée d'obtenir de nouvelles informations métaboliques susceptibles de servir la réalisation d'examens routiniers au laboratoire de biologie médicale.

De la santé humaine à celle de l'environnement : les algues

Les arbres ne sont pas les seuls à absorber du gaz carbonique à travers la photosynthèse atmosphérique grâce

à la photosynthèse. Les algues jouent également un rôle prépondérant dans la fixation du carbone. De ce fait surveiller la santé des océans (acidité de l'eau, équilibre phytoplancton-microbes...) est d'importance. Les diatomées se retrouvent dans tous les océans et même dans les eaux douces, suivre leur métabolisme et leur évolution constitue un biomarqueur. Parmi elles *Fragilariopsis cylindrus* vit dans les zones polaires et subit la nuit polaire pendant plusieurs mois avec un fort éclairage lors du retour à la lumière. Nous avons analysé par FFOTT *Fragilariopsis* en condition d'éclairage et après une obscurité de deux mois (figure 5 et référence 5), on peut noter la très forte réduction de l'activité métabolique dans ce dernier cas.

CONCLUSION

Nous avons introduit un montage interférométrique tomographique des objets biologiques, montage simple, performant et peu coûteux capable de révéler un contraste morphologique aussi bien que métabolique à l'échelle subcellulaire. Ce montage de FFOTT, du fait des trajets communs des ondes référence et objet, est très stable et ne nécessite pas les précautions que l'on prend avec FFOCT. Cependant cette approche par transmission nous limite à l'étude des échantillons peu épais optiquement. FFOTT nous semble cependant pouvoir jouer un rôle en tant que nouveau biomarqueur sans agent de contraste (label free). ●

RÉFÉRENCES

- [1] A. Dubois et C. Boccara, *Photoniques* **95**, 39 (2019)
- [2] F. Harms et C. Boccara. Chapter 25 of W. Drexler and J. G. Fujimoto, eds., *Optical Coherence Tomography* (Springer International Publishing, 2015).
- [3] V. Mazlin, O. Thouvenin, S. Alhaddad, M. Boccara, and C. Boccara, *Biomed. Opt. Express* **13**, 4190 (2022).
- [4] S. Alhaddad, O. Thouvenin, M. Boccara, C. Boccara and V. Mazlin, *Biomed. Opt. Express* **14**, 4845 (2023)
- [5] Nathalie Joli et al. accepted to *New phytologist* 2023

ALPHANOV, AU CŒUR DE VOS INNOVATIONS PHOTONIQUES POUR LA SANTÉ

Le nombre de dispositifs médicaux qui intègrent des solutions photoniques ne cesse de croître. Longtemps limités à des applications en ophtalmologie pour la chirurgie réfractive cornéenne (Laser excimer), en esthétique pour l'épilation, le détatouage ou le traitement des maladies de peau, ou plus récemment pour le traitement de la cataracte avec des lasers femtoseconde pour le LASIK ou le capsulorhexis, les lasers sont devenus de véritables outils chirurgicaux, des moyens de détection de tumeurs ou même encore d'identification et de tris de nano-vésicules.

En utilisant ses moyens techniques, ses plateformes et les expertises acquises depuis plus de quinze ans, le centre technologique Optique et Lasers ALPhANOV ne cesse d'accompagner des projets en vue de développer de nouveaux dispositifs médicaux et d'avoir la capacité d'accélérer la mise sur le marché de ces innovations.

Grâce à ses plateformes d'intégration et de pilotage agiles, ALPhANOV accompagne le développement de sources lasers spécifiques allant du régime continu au régime impulsif femtoseconde sur une gamme spectrale allant du proche infrarouge (780 nm - Erbium doublé) au moyen infrarouge (2000 nm- Thulium).

Le centre collabore avec la société CERTIS Therapeutics pour le développement d'une solution de thérapie interstitielle par laser LITT guidée par IRM. Les tumeurs ayant rarement une forme parfaitement sphérique, ALPhANOV développe des diffuseurs optiques polyvalents qui permettent un dépôt de dose optique conformationnel, capable de s'adapter aux géométries complexes des tumeurs.



1. Prototype XPulse, 2. Rack développé en collaboration avec Certis, 3. Microscope ALPhANOV, 4. Laser MIR PULS

Dans le domaine de l'imagerie non-linéaire à deux et trois photons, ALPhANOV propose une nouvelle source laser agile spectralement dans la gamme 1700 nm - 2000 nm (MIR_PULS)

ALPhANOV développe également une expertise forte dans le domaine des procédés laser appliqués à la santé. Au-delà de l'application en ophtalmologie décrite précédemment, les lasers femtosecondes deviennent aussi un véritable scalpel chirurgical pour la découpe de tissus mous mais également durs. Une plateforme robotisée intégrant un laser femtoseconde fibré est en cours de développement dans le cadre d'un projet collaboratif associant de nombreux partenaires Néo-Aquitains (Tecnalia, CRITT informatique, PPrime, CHU de Bordeaux). Il vise à adresser la chirurgie maxillo-faciale. Associé à un monitoring en ligne de type OCT, ce scalpel de nouvelle génération permettra de réaliser des découpes chirurgicales d'une très grande précision, sur des trajectoires complexes et surtout sans contact et en limitant le traumatisme pour le patient.

Les lasers femtosecondes se veulent de plus en plus puissants et énergétiques afin d'améliorer le taux de productivité de nombreuses applications industrielles mais pas seulement. Cette augmentation des performances permet également le développement de nouvelles sources secondaires de rayons X générés par laser. Cette typologie de sources à haute brillance ouvrant la voie au développement de nouvelles modalités d'imagerie comme l'imagerie X 3D à contraste de phase. Le projet XPulse porté et coordonné par ALPhANOV a pour ambition de développer un système de mammographie nouvelle génération dédié à la détection précoce du cancer du sein. Ce système intégrera une source de rayons X générés par laser et fournira des images 3D du sein à haute résolution et contraste tout en minimisant la dose de rayonnement administrée à la patiente.

L'avancée des connaissances d'ALPhANOV et les multiples innovations qui se succèdent révèlent chaque jour un peu plus le potentiel de la photonique pour des applications médicales. ●

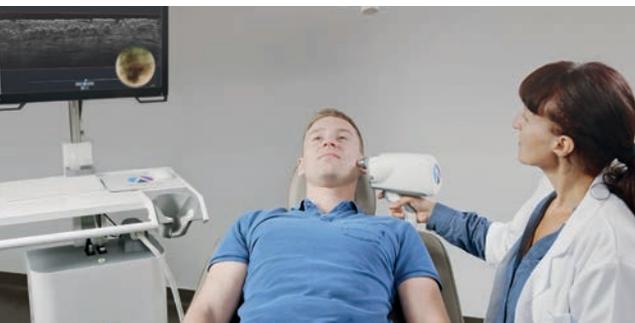
L'IMAGERIE DE LA PEAU PAR LC-OCT

Arnaud DUBOIS^{1,2,*}, David SIRET², Anaïs BARUT²

¹ Institut d'Optique, université Paris Saclay, Laboratoire Charles Fabry, Palaiseau, France

² DAMAE Medical, Paris, France

*arnaud.dubois@institutoptique.fr



La LC-OCT est une récente technique d'imagerie fournissant des vues en 2 ou 3 dimensions de l'intérieur de la peau avec une résolution micrométrique. La LC-OCT est basée sur un microscope optique interférométrique en éclairant la peau avec une ligne de lumière à large spectre. Cette technique d'imagerie non invasive est utilisée en dermatologie pour le diagnostic et le suivi thérapeutique de diverses lésions, notamment les cancers.

<https://doi.org/10.1051/photon/202312336>

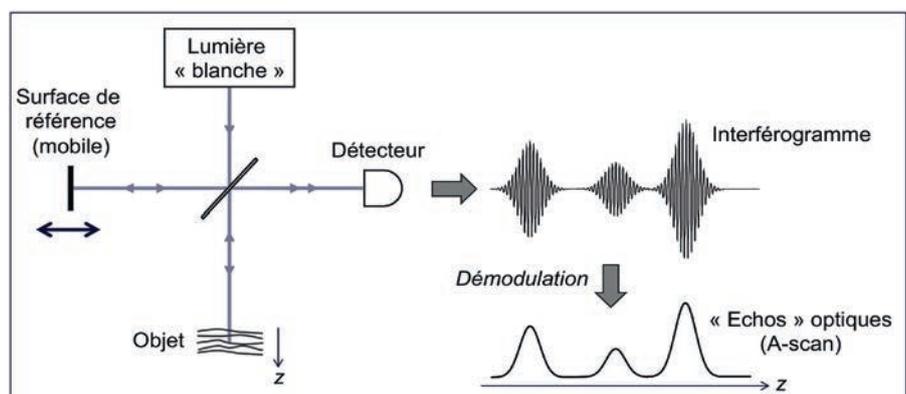
Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation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

Les cancers de la peau sont les cancers les plus fréquents chez l'homme. La procédure de diagnostic standard est basée sur un examen visuel de la surface de la peau, suivi, en cas de lésion suspecte, d'une biopsie pour une analyse histologique au moyen d'un microscope optique. Avec cette procédure invasive et longue, la majorité des biopsies révèle des lésions bénignes et certains cancers ne sont détectés qu'à un stade déjà avancé. Compte tenu de ces enjeux médico-économiques majeurs, des techniques d'imagerie non invasives ont été développées pour permettre une détection plus précoce et plus précise des cancers cutanés. Les techniques utilisées cliniquement pour l'imagerie de la peau *in vivo* à haute résolution sont la microscopie confocale en réflectance (RCM) et la tomographie

par cohérence optique (OCT). La RCM offre une résolution micrométrique, mais une profondeur de pénétration

limitée à environ 200 μm . De plus, les images RCM sont des vues de face, ce qui rend leur interprétation difficile par rapport aux images histologiques orientées verticalement. L'OCT fournit des images tridimensionnelles des tissus cutanés jusqu'à environ 1 mm de profondeur. Cependant, la résolution de l'OCT conventionnel (3-15 μm) n'est pas suffisante pour l'imagerie au niveau cellulaire.

Figure 1. Principe de l'OCT temporelle (« Time-domain Optical Coherence Tomography »). Un interférogramme est acquis en déplaçant la surface de référence de l'interféromètre. L'enveloppe de cet interférogramme donne la distribution en profondeur des structures réfléchissantes de l'objet (A-scan).



Acronyme de « Line-field Confocal Optical Coherence Tomography », la LC-OCT est une technique récente basée sur les principes de l'OCT et de la RCM, combinant ainsi les avantages de ces deux techniques en termes de résolution et de pénétration.

LA TECHNIQUE LC-OCT

Pour comprendre le principe de la LC-OCT, expliquons d'abord celui de l'OCT (voir Figure 1). Une source de lumière illumine, via une séparatrice de faisceau, l'objet à imager et une surface réfléchissante dite de référence. Un détecteur de flux (une photodiode) collecte le signal d'interférence résultant de la superposition de la lumière réfléchie par l'objet et de la lumière réfléchie par la surface de référence. Avec une source de lumière de spectre large – c'est à dire de faible cohérence temporelle – seules les réflexions par l'objet telles que le trajet aller-retour soit approximativement égal au trajet de référence peuvent donner lieu à des interférences. En balayant la longueur du bras de référence de l'interféromètre, le détecteur enregistre un signal d'interférence dont l'amplitude correspond aux « échos » optiques provoqués par la réflexion de la lumière par les structures internes de

l'objet (analogue à un A-scan en échographie). Une image en coupe verticale de l'objet (un B-scan) est obtenue par juxtaposition de A-scans acquis à des positions adjacentes en balayant le faisceau lumineux latéralement. Des structures réfléchissantes situées à des profondeurs différentes peuvent être distinguées dans une image OCT si la profondeur qui les sépare est supérieure à la longueur de cohérence. Ainsi, la résolution en profondeur en OCT est d'autant meilleure que la cohérence temporelle de la lumière est faible (voir encart).

En LC-OCT une image en coupe verticale (B-scan) est obtenue sans balayage latéral du faisceau – contrairement à l'OCT – car l'objet est éclairé par une ligne lumineuse et le signal détecté au moyen d'une caméra linéaire. Seul le balayage en profondeur reste nécessaire. La source de lumière utilisée en LC-OCT est un laser supercontinuum. Grâce au spectre extrêmement large de cette puissante source lumineuse, la résolution en profondeur des images atteint environ $1 \mu\text{m}$ à la longueur centrale de 700 nm (infrarouge proche). Pour obtenir une résolution latérale sensiblement égale, un objectif de microscope est utilisé pour former les images, sa mise au

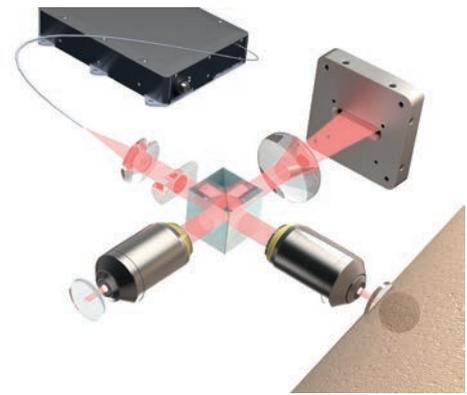


Figure 2. Illustration du dispositif expérimental mis en œuvre en LC-OCT, basé sur un interféromètre de Michelson avec un objectif de microscope dans chaque bras. La peau est éclairée par une ligne de lumière émise par une source laser supercontinuum. Les interférences lumineuses sont détectées par une caméra linéaire. Des images de l'intérieur de la peau en 2 ou 3 dimensions sont obtenues en balayant la ligne de lumière (systèmes de balayage non représentés sur ce schéma).

point étant ajustée automatiquement en fonction de la profondeur sondée. Un objectif de microscope identique est placé dans le bras de référence de l'interféromètre pour équilibrer les trajets optiques. La LC-OCT permet aussi d'obtenir des images en coupe horizontale en balayant la ligne ●●●



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

LEDs UV

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

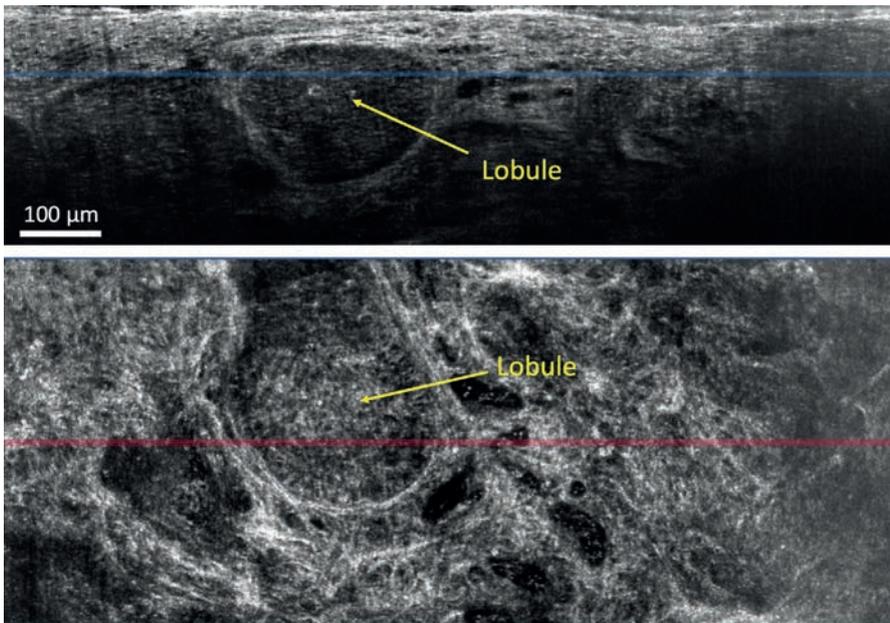
CARACTÉRISTIQUES
De 255nm à 405nm - Boîtier CMS ou traversant - Longue durée de vie - Large choix d'angles de distribution optique - Fortes puissances optiques - Lentilles verre/UV ou Silicon.

EXCLUSIVITÉ
Modules UVC/275nm (jusque 1000mW optiques) avec LED WICOP, forte densité mW/mm², chip compact (960x600μm), sans bonding.

Pour compléter cette technologie HTDS fournit également une gamme de photodiodes UV pour vos besoins de mesure UV.

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





d'éclairage latéralement à l'aide d'un miroir oscillant. Enfin, des images tri-dimensionnelles (3D) sont obtenues par concaténation d'une pile de coupes horizontales acquises en balayant la profondeur de l'objet. L'éclairage par une ligne de lumière fortement focalisée et la détection par une barrette de photodiodes de petite taille (les pixels du capteur de la caméra linéaire) empêche la lumière parasite diffusée par l'objet d'être détectée. Ce filtrage spatial dit « confocal », à la base de la technique RCM, contribue à la haute sensibilité de détection de la LC-OCT.

Inventée au laboratoire Charles Fabry à l'Institut d'Optique (brevet déposé en 2014), la technique LC-OCT est développée industriellement par la société DAMAE Medical. La miniaturisation de la technologie et l'optimisation de ses performances ont conduit à la commercialisation à partir de fin 2020 du dispositif deepLive™ sous la forme d'une sonde portable. Un bouton et une molette sur la poignée de la sonde permettent à l'utilisateur de sélectionner le mode d'imagerie (vertical, horizontal, 3D), d'ajuster la position des coupes dans les modes d'imagerie verticale et horizontale, ainsi que de lancer l'enregistrement d'images et vidéos. Une image de la surface de

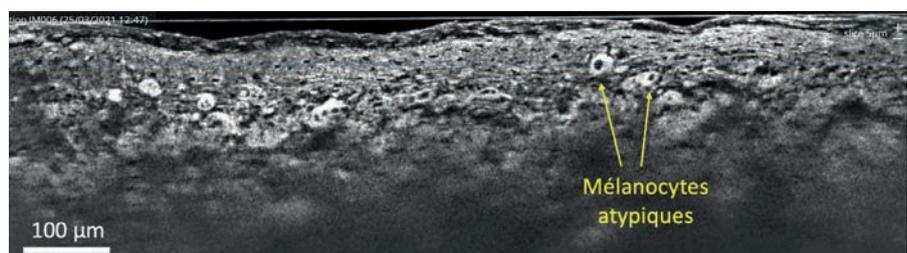
Figure 3. Images LC-OCT d'un carcinome basocellulaire révélant la présence d'un lobule cancéreux en profondeur. Vues en coupes verticale (haut) et horizontale (bas). Crédit : Prof J.L. Perrot, CHU Saint-Etienne.

la peau, affichée en temps réel, permet à l'utilisateur de repérer précisément l'endroit où les images LC-OCT sont acquises.

LA LC-OCT EN DERMATOLOGIE

De nombreuses études scientifiques ont démontré l'intérêt de la LC-OCT en dermatologie pour le diagnostic non invasif des lésions cutanées cancéreuses (carcinomes et mélanomes). En 2023, le dispositif deepLive™ a

Figure 3. Image LC-OCT d'un mélanome (vue en coupe verticale). Des mélanocytes atypiques sont présents tandis que la jonction derme-épiderme n'est plus discernable. Crédit : Prof J.L. Perrot, CHU Saint-Etienne.



obtenu le marquage CE en classe IIA pour l'aide au diagnostic non invasif du cancer de la peau, avec indication pour le dépistage et le diagnostic des lésions équivoques de carcinome basocellulaire. La LC-OCT s'avère également utile dans le cas des lésions inflammatoires et infectieuses.

L'utilisation de la LC-OCT devrait contribuer à améliorer la précision du diagnostic clinique en dermatologie, permettant la détection plus précoce des tumeurs malignes et la réduction du nombre d'excisions chirurgicales des lésions bénignes, ou encore l'imagerie des lésions où les biopsies sont dangereuses ou impossibles. De plus, la LC-OCT peut également être utilisée pour identifier la zone optimale où effectuer la biopsie dans le cas de lésions étendues, réduisant ainsi le taux de faux négatifs dus aux erreurs de prélèvement. Enfin, la LC-OCT présente un intérêt évident pour le suivi thérapeutique non invasif des lésions ne nécessitant pas l'ablation des tissus malades.

CONCLUSION

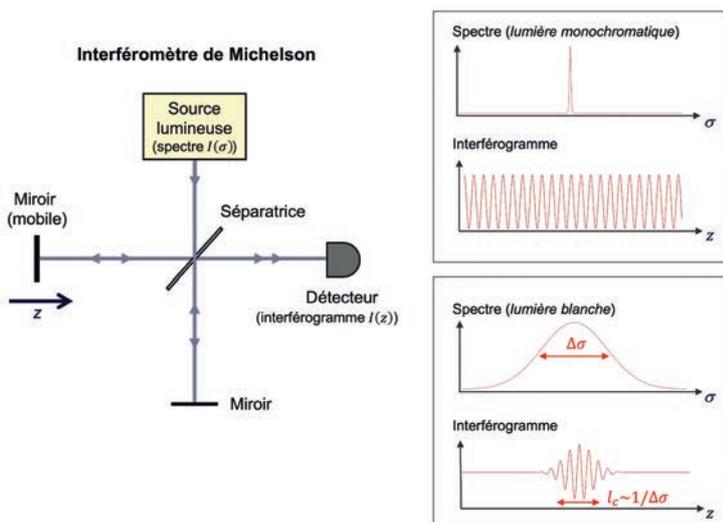
Capable de fournir des vues en 2 ou 3 dimensions de l'intérieur de la peau avec une résolution cellulaire, directement sur le patient, la technique LC-OCT présente un grand intérêt pour le diagnostic et le suivi thérapeutique non invasifs de nombreuses maladies cutanées dont les cancers. L'intelligence artificielle permet d'aider à l'analyse et l'interprétation des images acquises. Des algorithmes d'apprentissage profond sont en cours de développement pour détecter et identifier les lésions en temps réel pendant l'acquisition des images. Ces algorithmes guideront les examens en direct et, à terme, devraient

améliorer les diagnostics. L'intelligence artificielle permettra également de créer de nouvelles indications pour le suivi des

patients, comme l'évaluation des marges lors des interventions chirurgicales et le suivi des traitements non invasifs. ●

INFLUENCE DE LA LARGEUR SPECTRALE EN INTERFÉROMÉTRIE

Dans un interféromètre de Michelson, le faisceau lumineux émis par la source est divisé en deux par une lame semi-réfléchissante (séparatrice). Après aller-retour dans les deux bras de l'interféromètre, les faisceaux sont recombinaés et interfèrent. L'intensité lumineuse résultante dépend de la différence de trajet optique des deux faisceaux que l'on fait varier en translatant l'un des miroirs de l'interféromètre. Si la lumière est monochromatique, l'intensité détectée varie sinusoidalement, les interférences étant périodiquement constructives et destructives. Si la lumière est « blanche » (lumière de spectre large, c.à.d. de faible cohérence temporelle), les interférences sont observables seulement au voisinage de la différence de marche nulle (trajets optiques identiques), sur une plage égale à la longueur de cohérence, grandeur inversement proportionnelle à la largeur spectrale de la source de lumière.



RÉFÉRENCES

- [1] A. Dubois *et al.*, J. Biomed. Opt. **23**, 106007 (2018)
- [2] J. Ogien, O. Levecq, H. Azimani, A. Dubois, Biomed. Opt. Express **11**, 1327 (2020)
- [3] C. Ruini *et al.*, Skin Res. Technol. **27**, 340 (2021)
- [4] E. Cinotti *et al.*, Diagnostics. **13**, 361 (2023)
- [5] J. Perez-Anker *et al.*, Clin. Exp. Dermatol. **47**, 2222 (2022)



Q-PHASE

IMAGERIE QUANTITATIVE DE PHASE

Segmentation automatisée pour l'analyse de culture cellulaire

- ▲ Recherche sur le cancer
- ▲ Immunologie
- ▲ Toxicité médicamenteuse
- ▲ Virologie

● telight



PLATEFORME DE MICROSCOPIE INTRAVITALE IVM

Système d'imagerie confocale et 2-Photons de modèles animaux in vivo

- ▲ Modèles animaux de maladies humaines
- ▲ Contrôle d'efficacité médicamenteuse
- ▲ Recherche sur le cancer

IVIM
TECHNOLOGY



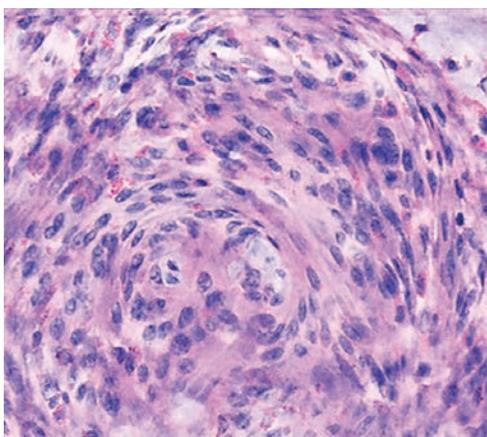
L'HISTOLOGIE RAMAN STIMULÉE

Hervé RIGNEAULT^{1,*} et Romain APPAY^{2,*}

¹ Aix Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, Marseille, France

² Assistance Publique des Hôpitaux de Marseille (APHM) et Aix-Marseille Université, Institut de Neurophysiologie, Marseille, France

*herve.rigneault@fresnel.fr - *romain.appay@ap-hm.fr



<https://doi.org/10.1051/photon/202312340>

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'HISTOPATHOLOGIE

L'anatomopathologie, ou histopathologie, est une spécialité médicale qui s'attache à examiner la structure microscopique des tissus et des cellules qui les composent afin de repérer des anomalies liées à une situation pathologique. Elle est en particulier primordiale dans le domaine de l'oncologie avec pour objectif d'établir le diagnostic d'une tumeur ainsi que d'évaluer les principaux facteurs d'agressivité contribuant ainsi à la décision thérapeutique. Le protocole standard nécessite de prélever un échantillon de tissu (biopsie ou pièce opératoire) qui est fixé dans du formol puis inclus dans un bloc de paraffine afin de pouvoir réaliser une section de quelques micromètres d'épaisseur qui est déposée sur lame et verre avant d'être marquée par

L'anatomopathologie est une spécialité médicale qui s'attache à examiner la structure microscopique des tissus et des cellules qui les composent afin de repérer des anomalies liées à une situation pathologique. Cet examen nécessite de réaliser un prélèvement tissulaire à partir duquel est effectué une section de quelques micromètres d'épaisseur qui est déposée sur une lame de verre et colorée pour pouvoir être examinée au microscope. Ce processus nécessite que du matériel biologique soit consommé car déposé sur une lame de verre, prend de 20 minutes (en version accélérée) à 24h et nécessite un travail de préparation de l'échantillon (congélation ou inclusion en paraffine). Nous décrivons ici une alternative émergente, non destructive, utilisant la diffusion Raman cohérente et qui permet de générer des images de qualité histologique en temps réel et sans aucune préparation de l'échantillon.

des colorants ayant une affinité préférentielle pour les noyaux des cellules (l'hématoxyline - H), les corps cellulaires (l'éosine - E) ou le collagène (le safran). Le résultat est une coupe colorée (Figure 1) pouvant être directement observée au microscope par un anatomopathologiste qui pourra établir un diagnostic sur son caractère pathologique. Reconnue au niveau international comme le « gold standard » du diagnostic des cancers, cette discipline mobilise en France 1600 anatomopathologistes (chiffre 2021) épaulés de nombreux techniciens. Le protocole standard (fixation au formol et inclusion en paraffine) nécessite entre 12h et 24h de préparation pour obtenir une image de bonne qualité. Une version accélérée (congélation de l'échantillon) nécessite 20-40 minutes, et est appelée

'examen extemporané', car il s'agit d'une approche utilisée au cours de l'intervention chirurgicale pour faire un retour immédiat au chirurgien sur le caractère cancéreux d'un tissu fraîchement excisé. Elle donne cependant des coupes de qualité dégradées par rapport au protocole standard. Par ailleurs l'anatomopathologie est une technique fondamentalement consommatrice de matériel biologique car l'échantillon coloré sur lame de verre ne peut pas être réutilisé pour effectuer un traitement plus approfondi comme l'identification de modifications protéiques (par marquage immunologique) ou génétiques (par séquençage de l'ADN et de l'ARN). Développer une technique histologique alternative rapide et ne nécessitant ni préparation ni consommation d'un matériel

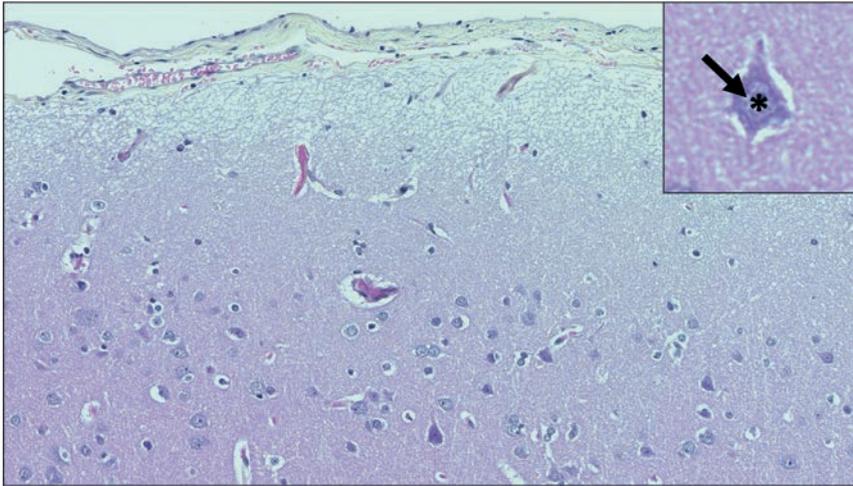


Figure 1. Coloration standard HES (Hématoxyline-Eosine-Safran) d'une section de cortex cérébral normal. L'hématoxyline est un colorant basique bleu ayant une affinité pour les éléments cellulaires chargés négativement comme les noyaux (*). L'éosine est un colorant acide rose ayant une affinité pour les éléments chargés positivement comme les cytoplasmes (flèche). Le safran colore le tissu conjonctif (visualisé en surface au niveau de la méninge).

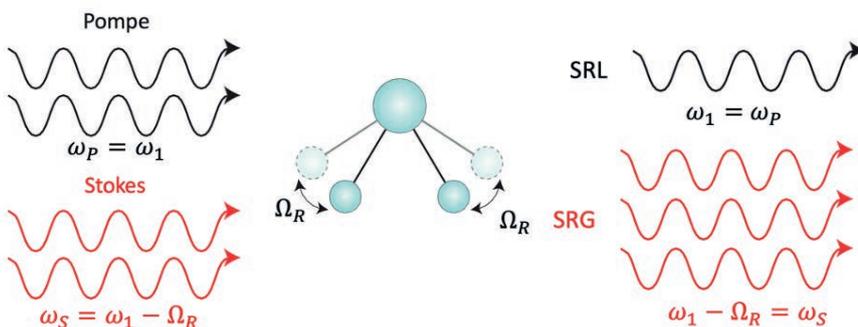
biologique précieux serait un réel progrès dont tireraient profils patients, chirurgiens et praticiens hospitaliers.

LE PROCESSUS RAMAN STIMULÉ

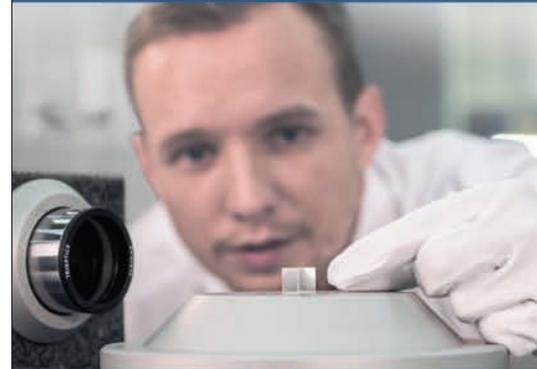
Contrairement à l'absorption infra-rouge qui permet d'adresser directement les niveaux vibratoires des molécules par absorption direct de rayonnement dans la gamme de longueurs d'ondes $50\mu\text{m} - 3\mu\text{m}$ [300cm^{-1} , 3000cm^{-1}], le processus Raman stimulé utilise la différence de fréquence entre deux ondes optiques moyen infra-rouge pour entrer en résonance avec les

modes vibratoires des molécules. La figure 2 précise la situation expérimentale ou deux ondes optiques sont incidentes sur une molécule dont le mode vibratoire est Ω_R . La première onde, dite pompe, de fréquence interagit avec la deuxième onde, dite Stokes, dont la fréquence vérifie $\omega_S = \omega_1 - \Omega_R$; de telle sorte que la différence de fréquence entre les ondes pompe et Stokes soit égale au mode vibratoire moléculaire, $\omega_P - \omega_S = \Omega_R$. Cette condition de résonance est nécessaire pour activer un ensemble de mélanges à quatre ondes faisant intervenir la matière par l'intermédiaire de la ●●●

Figure 2. Le processus Raman stimulé : deux ondes incidentes dites pompe et Stokes, dont la différence de fréquence optiques est Ω_R , interagissent par 'mélange à quatre ondes' avec une liaison chimique de fréquence vibrationnelle Ω_R et donnent naissance aux processus SRG (stimulated Raman gain) et SRL (stimulated Raman loss) Le processus SRG crée du gain sur le faisceau Stokes alors que le processus SRL crée des pertes sur le faisceau pompe.



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"

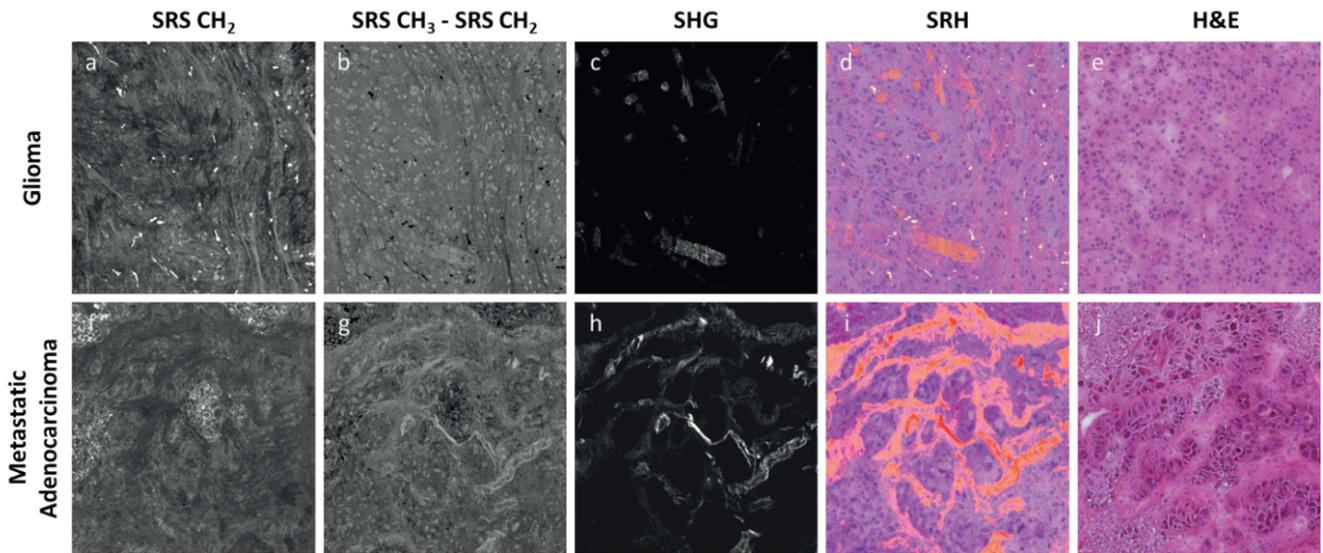


Station de centrage optique



TRIOPTICS France

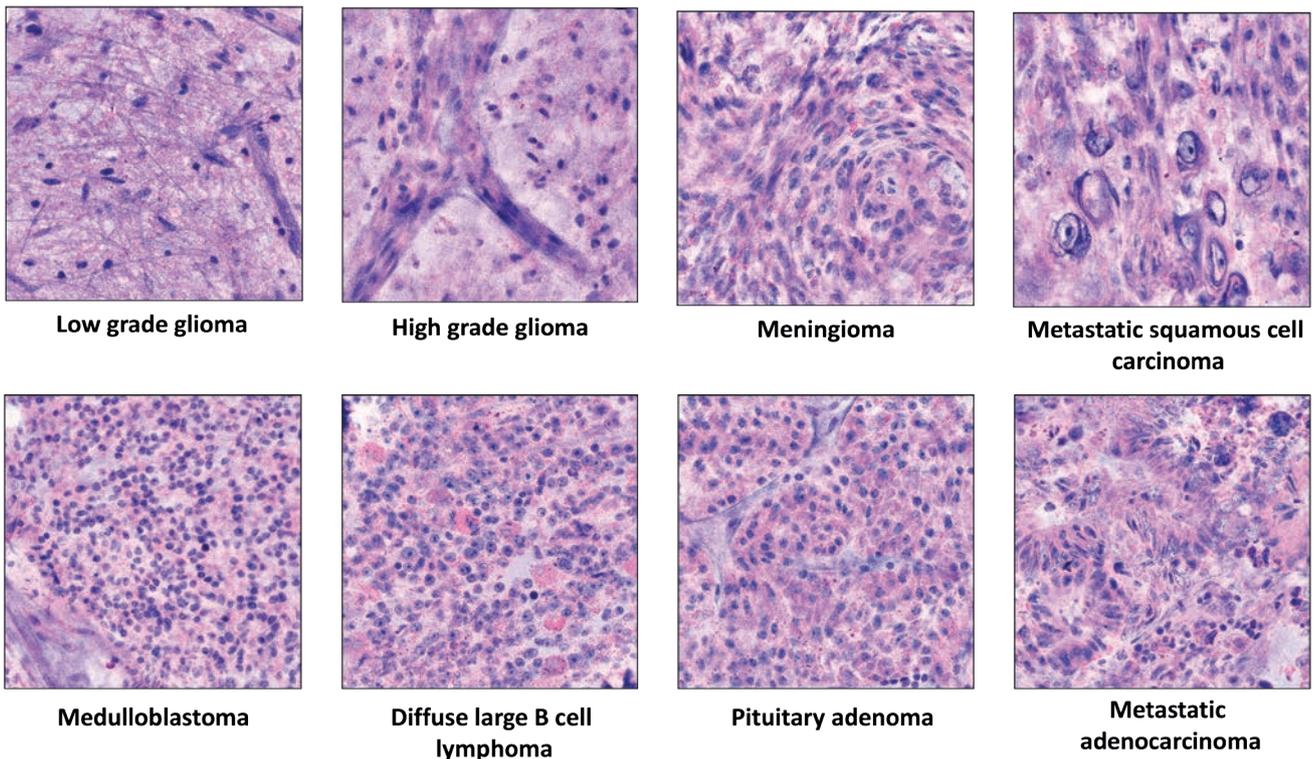
76 rue d'Alsace
69100 Villeurbanne
Tel. +33 (0)4 72 44 02 03
www.trioptics.fr



susceptibilité non linéaire d'ordre trois $\chi^{(3)}$ [1]. Le processus qui nous intéresse ici est le Raman stimulé, ou SRS pour 'stimulated Raman scattering' qui affecte les ondes incidentes pompe et Stokes en modifiant leur intensité. Le processus SRG, pour 'stimulated Raman gain' active la polarisation non linéaire $\vec{P}^{(3)}(\omega_{SRG}) = \chi^{(3)}(\omega_{SRG}; \omega_p, -\omega_s, \omega_s)$; $\vec{E}_p \vec{E}_s \vec{E}_p^*$ qui rayonne à $\omega_s = \omega_p - \omega_p + \omega_p$. On peut montrer que le champ SRG rayonné interfère constructivement avec le champ Stokes incident

Figure 3. Histologie Raman stimulée (SRH) d'échantillons de gliome et d'adénocarcinome métastatique du cerveau. En SRH l'acquisition simultanée des images correspondants aux liaisons chimiques CH_2 (a-f), CH_3 ainsi que (SHG – second harmonic generation) (c-h) (révélant le collagène) sont colorées virtuellement pour générer des images SRH (d-i) qui rapportent des informations très similaires à l'histologie standard (e-j) utilisant l'hématoxyline et l'éosine. La force de l'image SRH provient de l'aptitude de la différence des images CH_3-CH_2 (b-g) à révéler les noyaux des cellules (b-g). Taille des images $200\mu m \times 200\mu m$.

Figure 4. L'imagerie SRH permet d'identifier les principaux types de tumeurs cérébrales. Barre d'échelle : $50\mu m$



Nouvel e-Learning
Sensibilisation à la Sécurité Laser



Grâce à l'e-learning, vos collaborateurs explorent en toute autonomie les pratiques essentielles leur permettant de travailler en sécurité dans une zone de danger laser.

En savoir plus :



<https://pyla-formation.com/>

Nos formations en sécurité laser en présentiel restent également disponibles :

- PISL : Personne Informée à la Sécurité Laser
- PERL : Personne Exposée au Risque Laser
- PCSL : Personne Compétente en Sécurité Laser



pour en augmenter son intensité, d'où la terminologie 'stimulated Raman gain'. Le processus SRL, pour 'stimulated Raman loss' est symétrique du processus SRG, il active la polarisation $\vec{P}^{(3)}(\omega_{SRL}) = \chi^{(3)}(\omega_{SRL}; \omega_S, -\omega_S, \omega_P); \vec{E}_S \vec{E}_P \vec{E}_S^*$ qui rayonne à $\omega_P = \omega_S - \omega_S + \omega_P$. On peut montrer que le champ SRL rayonné interfère destructivement avec le champ pompe incident pour en

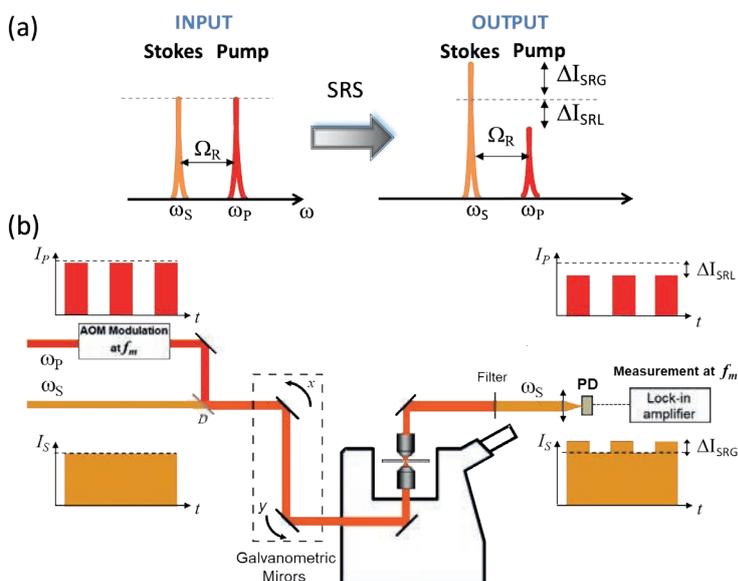
diminuer son intensité, d'où la terminologie 'stimulated Raman loss' (voir Fig. 1 b). Le lecteur trouvera une présentation plus complète dans [2].

L'HISTOLOGIE RAMAN STIMULÉE

L'histologie Raman stimulée, ou SRH pour 'stimulated Raman histology' consiste à imager les liaisons chimiques CH₂ et CH₃

MICROSCOPIE SRS (STIMULATED RAMAN SCATTERING)

La détection SRS est très différente d'une détection de fluorescence. Il s'agit de détecter le gain ΔI_{SRG} ou perte ΔI_{SRL} des faisceaux pompes et Stokes après l'interaction SRS avec l'échantillon (Figure (a)). En pratique ces gains et pertes différentiels sont très faibles $\left| \frac{\Delta I_{SRG}}{I_S} \right| \approx \left| \frac{\Delta I_{SRL}}{I_P} \right| \approx 10^{-4}, 10^{-6}$. Pour atteindre une telle sensibilité on module un des faisceaux en amplitude à une radio fréquence f_m suffisamment grande pour s'affranchir des bruits mécaniques, typiquement $f_m > 1\text{Mhz}$. Dans la figure (b) on a choisi d'illustrer le cas où c'est le faisceau pompe qui est modulé à la fréquence f_m , la microscopie SRS consiste à focaliser les faisceaux pompe et Stokes sur l'échantillon et à détecter le transfert de modulation du faisceau pompe modulé vers le faisceau Stokes non modulé. Pour cela on utilise une photodiode et un amplificateur à détection synchrone et on détecte ΔI_{SRG} à la fréquence f_m . L'image SRS est reconstruite en mesurant ΔI_{SRG} par balayage spatial des faisceaux pompe et Stokes sur l'échantillon à l'aide de miroir galvanométriques [3].



dans les tissus par SRS (le principe de la détection SRS est précisé dans l'encart 1). Les liaisons CH_2 se localisent plutôt dans les cytoplasmes cellulaires et dans les amas lipidiques tandis que les liaisons CH_3 sont présentes dans les fibres, dans la matrice extracellulaire et plus particulièrement dans les noyaux cellulaires. C'est cette diversité de localisations des différentes liaisons chimiques qui va permettre *in fine* de réaliser une image informative avec des noyaux, des cytoplasmes et fibres qui vont pouvoir être différenciés. Le microscope SRH n'est autre qu'un microscope SRS qui peut imager simultanément les liaisons chimiques CH_2 et CH_3 [3]. Il est possible d'enrichir l'image SRH en lui adjoignant l'information contenue dans l'image de génération du second harmonique (SHG pour second harmonic generation) qui révèle la présence des fibres de collagène. Une fois les images CH_2 (Fig. 3 a,b), CH_3 (et éventuellement SHG- Fig 3 c,h) acquises, on procède à une coloration virtuelle dans les tons de rose-violet des images CH_2 et CH_3 - CH_2 (Fig. 3 b,g). Cette dernière différence d'image (CH_3 - CH_2) a la particularité de révéler les noyaux cellulaires qui est un élément clé de l'analyse histopathologique (Fig. 3 b,g). La figure 3 présente les images brutes CH_2 , CH_3 - CH_2 et SHG ainsi que les images SRH obtenues (Fig. 3 d,i) et leur comparaison avec les images histologiques standards (H&E) pour deux échantillons de tumeurs cérébrales (un gliome et un adénocarcinome métastatique).

On peut apprécier la concordance qu'il existe entre les images SRH et les images H&E. L'image SRH utilisant le SHG révèle la présence du collagène (en orange sur les Fig. 3 d,i) qui n'est pas présent sur l'image classique H&E.

Il est important de noter qu'une image SRH sur un champ de vue de $300\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$ peut être obtenue en quelques secondes et une image sur un champ de $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ en quelques minutes [4]. Cela est significativement plus rapide que l'examen anatomopathologique extemporané (20-40 minutes).



Figure 5. Vue d'un microscope SRS commercial permettant de réaliser des images SRH mais aussi d'acquérir des images dans la zone spectrale du fingerprint (système BondXplorer de la société Lightcore Technologies - <https://lightcore.tech/>).

Nous avons pu utiliser l'imagerie SRH pour imager les principaux types de tumeurs cérébrales [4]. Pour cela des prélèvements réalisés au cours de l'intervention chirurgicale ont suivi deux voies. La première consistait à imager l'échantillon en SRH puis à utiliser l'échantillon imagé pour réaliser des analyses complémentaires d'immunohistochimie et de biologie moléculaire. La deuxième voie est le protocole classique qui utilisait une partie du matériel pour réaliser des coupes histologiques H&E et une autre partie du matériel pour réaliser les études complémentaires.

Nous avons pu montrer que les images SRH permettent de diagnostiquer sans hésitation les principaux types de tumeurs cérébrales (Figure 4) et que l'image SRH n'altère en rien des résultats des analyses immunohistochimiques et de biologie moléculaire complémentaires [4]. Il s'agit d'un résultat important qui indique que l'imagerie SRH permet de

réduire la consommation de matériel biologique, ceci est particulièrement pertinent dans le cas de prélèvements stéréotaxiques chez l'enfant ou le volume des biopsies cérébrales est très limitée. Réaliser l'histologie et les analyses moléculaires sur un même échantillon est une rupture par rapport au protocole établi.

LE SRH POUR ALLER PLUS LOIN QUE LA MORPHOLOGIE

Bien que l'imagerie SRH soit déjà très intéressante pour révéler l'architecture des tissus (Figure 4) il est également intéressant de s'intéresser à d'autres liaisons chimiques (que les liaisons CH_2 et CH_3) pour apporter d'autres informations moléculaires ou métaboliques sur les tissus. Le domaine spectral des vibrations situées entre 500cm^{-1} et 1800cm^{-1} et dit du 'fingerprint - empreinte en français' a été abondamment renseigné dans la littérature par la communauté Raman spontanée comme portant des signatures moléculaires associées aux tumeurs et à d'autres pathologies. Associé à l'image CH_2/CH_3 histologique, ces images acquises dans la zone du 'fingerprint' doivent étendre la portée des images SRH. Il faut pour cela changer la différence de fréquence $\omega_p - \omega_s = \Omega_R$ ce qui est réalisé en pratique avec un oscillateur paramétrique optique (OPO) [3]. La figure 5 présente un exemple de microscope SRS commercial utilisant une source OPO et qui peut réaliser des images SRH dans toutes les zones du spectre vibrationnel. Il y a ainsi espoir d'aller plus loin que l'histologie morphologique avec l'imagerie SRH. ●

RÉFÉRENCES

- [1] H. Rigneault, *Photoniques* **121**, 56 (2023)
- [2] H. Rigneault *et al.*, *APL Photonics* **3**, 091101 (2018)
- [3] S. Heuke *et al.*, *Biomed. Opt. Express* **12**, 7780 (2021)
- [4] R. Appay *et al.*, *J. Phys. Chem* **127**, 3624 (2023)

OPTIMISATION DE L'IMAGERIE DE SPECKLE DYNAMIQUE DÉPOLARISÉ : VERS UNE APPROCHE PRATIQUE ET INNOVANTE EN MÉDECINE

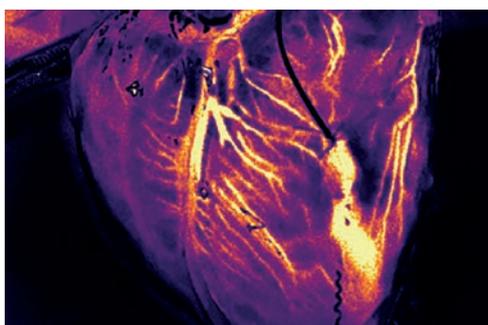
Elise COLIN^{1,3,*}, Xavier ORLIK^{2,3}, Aurélien PLYER^{1,3}

¹ DTIS-Onera, Université Paris Saclay, France

² DOTA/Onera, Université Paul Sabatier, Toulouse, France

³ ITAE Medical Research, Pechabou, France

*Elise.colin@onera.fr



L'imagerie de speckle dynamique, méthode prometteuse et économique pour capturer les micro-mouvements, a récemment été améliorée par l'utilisation de la polarimétrie. Notre recherche vise à proposer un nouvel indice universel et reproductible, pour quantifier la microcirculation, facilitant ainsi le diagnostic et le suivi du patient pour diverses pathologies, par des comparaisons intra et interindividuelles.

<https://doi.org/10.1051/photon/202312345>

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

L'imagerie de speckle dynamique a été développée dès les années 80. Cette technique exploite l'analyse des motifs résultant des interférences constructives ou destructives de l'onde lumineuse avec un objet diffusant, afin de capturer des informations dynamiques. Cette méthode a trouvé des applications dans divers domaines, de la recherche en biologie à la médecine en passant par l'analyse de matériaux, car elle offre un moyen non invasif et économique de surveiller les micro-mouvements dans une grande variété de contextes.

Ce qui rend cette technique particulièrement attrayante dans le cadre de la médecine, c'est avant tout son

caractère non invasif. Contrairement à de nombreuses autres méthodes d'imagerie médicale, l'imagerie de speckle dynamique ne nécessite pas d'intervention ni d'administration de substances exogènes dans le corps du patient. De plus, la technologie est peu coûteuse par rapport à d'autres techniques d'imagerie médicale plus sophistiquées. Cette accessibilité financière élargit sa portée potentielle, permettant à un plus grand nombre de chercheurs et de professionnels de la santé de l'utiliser dans leurs travaux de recherche ou de diagnostic. Un autre de ses avantages est le faible encombrement de cette modalité d'imagerie. Enfin, cet appareil plein champ offre la possibilité d'observer

des phénomènes dynamiques en temps réel. Cet aspect est particulièrement intéressant pour étudier la vascularisation de la peau lors de la reconstruction dermique après une greffe, ou encore le suivi du réseau vasculaire lors de procédures chirurgicales.

Néanmoins, la technique de l'imagerie de speckle dynamique présente des limitations qui pourraient expliquer son déploiement limité dans les systèmes actuels d'imagerie médicale. En premier lieu, le paramètre visualisé par cette méthode est peu conventionnel. Le speckle dynamique fait partie des modalités d'imagerie d'activité, au même titre que le PET ou l'IRM fonctionnelle : au lieu de correspondre à une ●●●

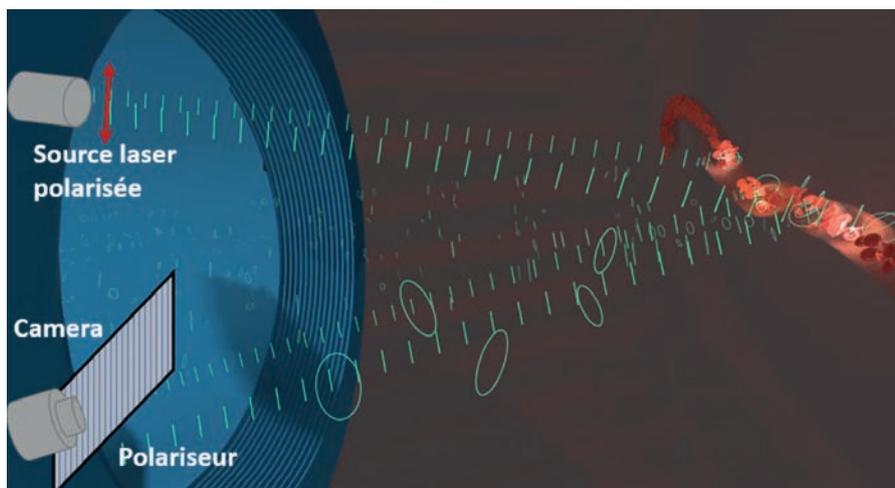


Figure 1. Le principe de l'acquisition repose sur l'emploi d'une source laser cohérente polarisée, d'un polariseur croisé et d'un détecteur. Les multidiffusions de la lumière avec les cellules qui composent le sang en mouvement provoquent un désordre total dans les états polarimétriques renvoyés. Le signal du MicroVasculoscope est généré à partir de ce désordre.

image de radiométrie statique, l'information obtenue est liée à l'activité au sein de l'échantillon observé. D'un autre côté, la qualité des résultats obtenus avec l'imagerie de speckle dynamique dépend de la profondeur de pénétration de la lumière dans l'échantillon, mais aussi des paramètres d'acquisitions tels que le temps d'intégration, qui sont à optimiser en fonction du dynamisme du phénomène observé. Il y a donc pour chaque application une étape de dimensionnement et de réglage du système à ne pas négliger pour obtenir les résultats optimaux.

Bien que des tentatives aient été faites pour convertir les indices mesurés en une mesure quantifiée de vitesse ou de débit, ces approches ne sont pas parfaites, en raison à la fois de la complexité du phénomène observé et du nombre d'inconnues physiques. Par exemple, les trajets multiples des photons dans la matière entraînent une dépendance entre la densité des diffuseurs (ou densité de la matière) et les composantes en vitesse reconstruites par imagerie de speckle dynamique. Or, cette information de densité varie en fonction de l'échantillon observé, et elle est rarement connue. Aussi, inverser une vitesse à partir de la mesure de speckle dynamique est une tâche qui n'est soluble que dans des cas particuliers. Face à ces limitations, nous avons proposé la définition d'un nouvel indice

reproductible, étalonné et interprétable, assurant ainsi une utilité pratique dans le contexte médical.

Enfin, étant donné que le speckle dynamique est intrinsèquement lié aux micro-mouvements, il est essentiel de surmonter les défis liés aux macro-mouvements parasites. Lorsque l'on travaille avec des échantillons biologiques ou des structures en mouvement, il est nécessaire de développer des techniques qui permettent d'isoler les mouvements d'intérêt et de minimiser les interférences dues à d'autres mouvements non pertinents.

C'est l'ensemble de ces limitations que nous avons abordées dans le cadre de notre travail de recherche, visant à exploiter pleinement le potentiel accessible et novateur de l'imagerie de speckle dynamique dépolarisé dans le domaine de la santé. En collaborant étroitement avec des professionnels de la médecine, nous avons pu simultanément mettre à jour et explorer de nouvelles applications potentielles, tout en relevant un certain nombre de défis :

reproductibilité de la mesure, maîtrise des mouvements parasites.

Cette approche collaborative a permis une compréhension plus approfondie des besoins spécifiques du domaine médical, conduisant à des ajustements et des améliorations continues de notre méthodologie. En résulte une démarche plus adaptée et efficiente, renforçant ainsi la pertinence de l'imagerie de speckle dynamique dépolarisé dans le contexte médical, tout en ouvrant la voie à des perspectives innovantes pour son utilisation future.

LA PROPOSITION D'UN NOUVEL INDICE : LE MAI

De nombreux indices sont disponibles pour obtenir une image en contraste de speckle. Certains d'entre eux exploitent la corrélation entre des images successives, ou la corrélation entre la première image et l'image en cours considérée. Parmi les paramètres disponibles, l'indice de Fujii utilise le contraste entre deux images successives moyennées. Les critères de différences généralisées (GD), pondérées (WGD) ou non, reposent sur des moyennes de norme L1 des différences d'intensités entre toutes les paires d'images possibles.

Plus récemment, les recherches se sont orientées vers le contraste de speckle, défini comme l'écart type sur la moyenne. Ce paramètre peut être calculé de manière spatiale ou temporelle. Certains modèles de diffusion ont établi une relation entre le coefficient de contraste temporel et la fonction d'autocorrélation temporelle du champ, puis la vitesse de décorrélation d'une population, en considérant différents modèles de vitesse tels que Lambertien ou Gaussien. Pour ces différentes hypothèses de distributions de vitesse, le modèle démontre que le contraste est proportionnel à l'inverse du temps de décorrélation, que ce soit avec un modèle de vitesse Lambertien ou Gaussien. Il est à noter qu'actuellement, à notre connaissance, aucun des modèles établissant une relation entre la fonction d'autocorrélation du

speckle et le contraste de speckle n'a été formulé pour des diffusions d'ordre supérieur à 1. Néanmoins, cet indice dépend de la polarisation choisie.

D'un autre coté nous avons proposé l'indice VMAI (Volume Microvascular Activity Index), défini comme :

$$VMAI = \frac{1}{\tau_{CV}} = \frac{1}{T \cdot C_{\perp}^2}$$

où τ_{CV} représente le temps de décorrélation d'un volume diffusant, déduit de la mesure du contraste temporel en polarisation croisée C_{\perp} , et T est le temps d'intégration de chaque image de la séquence. L'utilisation d'états polarimétriques orthogonaux pour effectuer la mesure de cet indice fait l'objet d'un brevet.

REPRODUCTIBILITÉ DES MESURES ET ÉTALONNAGE

L'étude des propriétés de stabilité spectrale d'un laser est cruciale pour établir un critère reproductible. La solution que nous proposons ne réside pas dans une avancée technologique, mais plutôt dans une approche algorithmique, afin de sélectionner les plages temporelles de données où les propriétés de cohérence temporelle du laser sont respectées. Cette proposition a fait l'objet d'une demande de dépôt de brevet.

Une fois la stabilité spectrale assurée, nous avons démontré l'excellente constance des mesures à travers le temps, ainsi que la cohérence entre les résultats obtenus avec différents lasers, notamment lors du suivi d'angiomes. Le

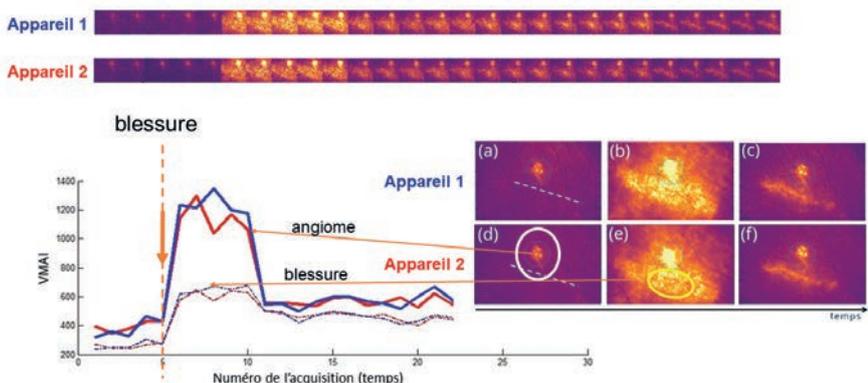
coefficient de Pearson met ainsi en évidence l'excellente corrélation entre deux acquisitions d'images indépendantes d'un même angiome capturé par deux dispositifs distincts.

Bien que le VMAI ne trouve pas actuellement une interprétation directe en termes de flux ou de vitesse, nous proposons son utilisation en tant que nouvelle grandeur, garantissant une reproductibilité sur plusieurs appareils distincts. Cette approche contribue ainsi à établir une base solide pour l'utilisation du VMAI dans des contextes cliniques, renforçant sa pertinence en tant que paramètre mesurable stable et fiable.

L'APPORT DE LA POLARISATION

Les lasers que nous utilisons émettent une lumière polarisée, or, suivant le matériau que l'on observe, la lumière renvoyée peut naturellement être dépolarisée. Dans le développement du VMAI, nous avons initialement suggéré l'utilisation d'un filtre orthogonal à la polarisation d'émission, notamment afin de s'affranchir au maximum des diffusions d'ordre 1 au profit des diffusions multiples d'ordres supérieurs. Toutefois, nous avons également exploré la possibilité de faire varier la polarisation de réception. En effectuant cette variation dans une base polarimétrique complète, nous ouvrons la voie à une imagerie de speckle dynamique en imagerie de Stokes. De plus, en variant également la polarisation d'émission pour explorer ●●●

Figure 2. Deux acquisitions obtenues par deux appareils indépendants, et mesure de la dynamique autour d'un angiome et d'une blessure périphérique. Les deux appareils exhibent des valeurs comparables.



Solutions de soudure optique pour le marché de la Photonique



Nouvelle plateforme de fusion par laser CO2 LQM125A+ Fujikura

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



Soudeuse FSM100P+ Fujikura

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



Nouveau cliveur CT106+ Fujikura

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

l'ensemble des états possibles, nous avons la possibilité d'une imagerie de speckle dynamique de Mueller.

Actuellement, nous réfléchissons de manière approfondie à la polarisation, avec deux objectifs principaux :

- Optimiser le signal reçu en fonction des polarisations,
- Mieux comprendre les liens entre dépolarisation et décorrélation de speckle.

Les premières étapes de ce travail ont confirmé l'efficacité de la polarisation orthogonale dans l'amélioration de la qualité d'image de contraste, comme illustré dans la figure obtenue lors de l'étude des deux greffons cardiaques.

Parallèlement, nous avons proposé une extension de la notion de contraste de speckle au cas polarimétrique multivarié. Cependant, les propriétés de ces nouveaux critères nécessitent une exploration approfondie. Ces travaux se poursuivent actuellement en collaboration avec le LPICM.

APPLICATIONS DANS LE DOMAINE MÉDICAL

Les applications de l'imagerie de speckle dynamique dans le domaine biologique sont regroupées sous la dénomination de biospeckle. Notre attention s'est orientée dans un premier temps vers des applications liées à la santé, privilégiant autant que possible des applications in vivo. ITAE a été pionnier dans l'introduction d'applications dans le domaine de la cancérologie cutanée, complétant ainsi les modalités d'imagerie radiométriques classiques (OCT, IRM, etc.) par une modalité d'imagerie du mouvement.

Nous avons établi une collaboration fructueuse avec le Professeur Gilles Favre, directeur scientifique de l'Oncopole de Toulouse, pour obtenir des images de mélanomes et de

codage orientation filtre polarimétrique

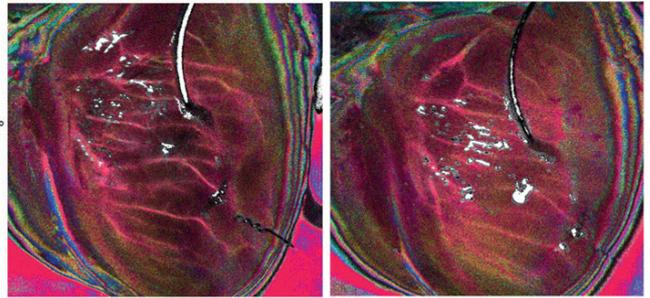
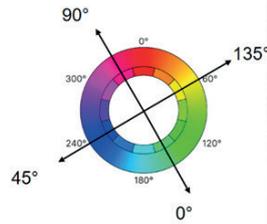


Figure 3. Deux compositions colorées en fausse couleur, obtenues à partir de la superposition colorée de 4 images de contrastes obtenues pour 4 orientations de polariseurs différentes grâce à la Caméra polarimétrique à grille Sony, sur un greffon cardiaque. (Images acquises pendant le projet ECHORONEX, soutenu par la Fondation Cœur et Recherche (Paris, France) et par l'Association pour le Développement et l'Amélioration des Techniques de Dépistage et de Traitement des Maladies Cardiovasculaires (ADETEC, Suresnes, France)).

carcinomes humains. Muriel Golzio, directrice de recherche CNRS à l'IPBS de Toulouse, et son équipe ont utilisé le micro-vasculoscope pour observer la néo angiogénèse, la formation de nouveaux vaisseaux sanguins, dès les premières heures après l'inoculation de cellules de mélanome. Suite à un test thérapeutique, leur équipe a également observé la rétraction de ce réseau sanguin, ouvrant ainsi la voie à des tests précoces de nouvelles thérapies et à une évaluation rapide de leur efficacité.

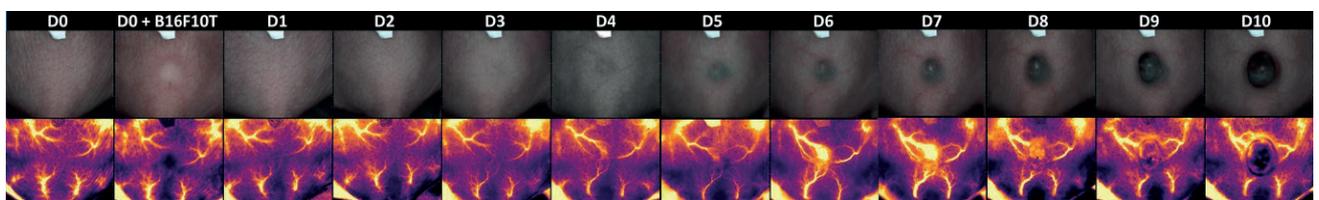
Au CHU de Bordeaux, le Professeur Pélissier et le Docteur de Luca ont obtenu des images de brûlures et d'épidermisation, phase finale de la cicatrisation. Ces dernières permettent d'aider à la décision de greffe de peau ou non, et de connaître les chances de succès d'une greffe.

La dernière expérience scientifique a été menée en collaboration avec le Dr. Julien Guihaire et son équipe à

l'Hôpital Marie Lannelongue. Dans le cadre de recherches visant à améliorer la viabilité d'une greffe cardiaque, la circulation est maintenue dans l'organe grâce à une machine de perfusion extracorporelle. Notre appareil a permis d'observer, pour la première fois, la circulation sanguine dans les vaisseaux d'un cœur en état de battement. A cette occasion, nous avons répondu à la question des macro-mouvements parasites du greffon par un algorithme de post-traitement visant à calculer le coefficient de contraste sur une population d'images qui ne sont pas altérées par des déplacements perceptibles.

La reproductibilité des mesures par des appareils indépendants est une étape clé pour favoriser de nouveaux types de mesures, essentielles pour tout processus impliquant la microcirculation. D'un point de vue pratique, les principales perspectives comprennent la mise au point de champs de vue plus larges, pour des échelles d'investigations plus grandes, et la miniaturisation de l'appareil pour une utilisation en endoscopie, afin d'atteindre des images intra-corporelles.

Figure 4. Évolution temporelle d'un mélanome implanté sur un modèle murin.



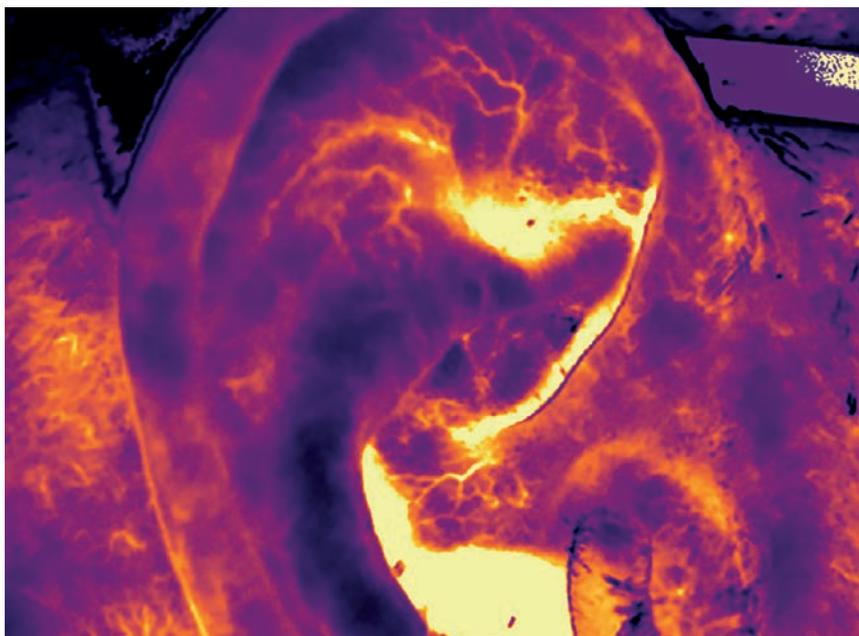


Figure 5. Imagerie Grand champ sur l'oreille, révélant un réseau de microvascularisation riche.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La technologie de l'imagerie de speckle dynamique dépolarisé offre de nouvelles perspectives dans le domaine de la santé. Avec ses applications potentielles en cancérologie, cardiologie, greffes de peau et d'autres domaines, cette innovation promet de transformer la manière dont nous diagnostiquons, suivons et traitons diverses affections médicales. Grâce à notre compréhension approfondie des fondements de cette technologie et à notre engagement envers la recherche continue et le développement, nous sommes sur le point d'élargir les possibilités dans le domaine de la santé.

Nos travaux futurs s'articuleront autour de deux axes majeurs. Tout d'abord, nous visons à optimiser l'utilisation de la polarisation dans nos mesures, cherchant à affiner notre compréhension de ses implications pour une amélioration significative des résultats. Parallèlement, nous envisageons d'élargir le cadre de modélisation des statistiques du speckle dynamique. Cette expansion inclura le cas multivarié, englobant à la fois la polarimétrie et l'axe temporel. Cette approche plus intégrative vise à une meilleure optimisation des indices associés, renforçant ainsi la pertinence et la précision de nos mesures dans des contextes variés, y compris dans d'autres domaines que celui de la santé. ●

RÉFÉRENCES

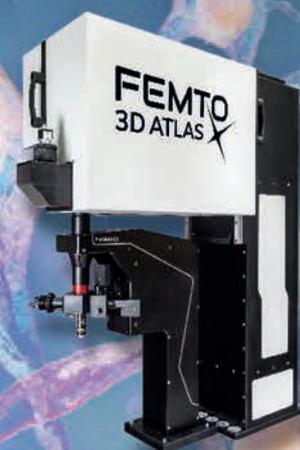
- [1] E. Colin, A. Plyer, M. Golzio, N. Meyer, G. Favre, X. Orlik, J. Biomed. Opt. **27**, 046003 (2022)
- [2] A. Plyer, E. Colin, X. Orlik, A. Akamkam, J. Guihaire, J. Biomed. Opt. **28**, 046007 (2023).
- [3] S. Erdmann, F. Weissgerber, É. C. Koeniguer, X. Orlik, Opt. Express **30**, 11923 (2022).
- [4] D. Briers, D. D. Duncan, E. Hirst *et al.* J. Biomed. Opt. **18**, 066018 (2013).
- [5] E. Colin, The speckle contrast extended to the polarimetric case: applications to radar and Laser images. arXiv preprint arXiv:2306.05441. (2023)
- [6] H. J. Rabal, R. A. Braga Jr, Dynamic laser speckle and applications. CRC press. (Eds.) (2018)



info@laser2000.fr • www.laser2000.com

Your
Biophotonics
Experts

Solutions and Products
for:



Fluorescence Microscopy
Ophthalmology
Multiphoton Microscopy
Optical Tweezers
and many more

FEMTONICS

Oxxius

modulight

bluebox
optics

FYLA

Semrock



COMPRENDRE L'INTERFÉROMÉTRIE À DÉCALAGE MULTILATÉRAL

Jérôme PRIMOT*, Cindy BELLANGER

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

*jerome.primot@onera.fr



L'interférométrie à décalage multilatéral est une technique d'analyse optique aux multiples applications. Basée sur un procédé simple, extension avantageuse de l'interférométrie à décalage, elle a permis de développer un grand nombre de dispositifs, chacun adapté à un besoin particulier de mesure. Elle correspond à un changement de paradigme qui voit maintenant les utilisateurs chercher à approcher au mieux des objets d'intérêt à analyser sans les perturber, en respectant au mieux les conditions environnementales. Le fait de se spécialiser dans un type de mesure permet en particulier d'introduire des connaissances *a priori* qui aident à la qualité de la mesure.

<https://doi.org/10.1051/photon/20231250>

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.

Apparue dans les années 90 et développée industriellement depuis les années 2000, l'interférométrie à décalage multilatéral connaît un grand essor ces dernières années dans des domaines aussi distincts que le contrôle des lasers ultra-intenses, l'analyse des plasmas, la biologie, la médecine, la nanophotonique, l'endommagement laser (voir Photoniques 118), le contrôle non destructif en rayons X voire le contrôle optique des métasurfaces ou des surfaces morcelées. Son émergence coïncide avec un changement de paradigme en matière d'interférométrie : ce n'est plus l'échantillon qu'on amène dans la salle d'interférométrie, mais l'interféromètre qu'on fait entrer dans l'environnement de l'objet ou du faisceau à tester.

L'utilisateur s'y retrouve, car le processus de mesure est plus simple et plus réaliste s'il est mené in-situ.

Par principe, l'interférométrie à décalage multilatéral [1-2] est robuste et compacte et donc parfaitement adaptée pour s'adapter aux conditions spécifiques d'un banc d'essai, d'un bras de contrôle ou d'un microscope, avec un minimum d'impact sur la mesure et son environnement. La conséquence de cela est l'apparition d'une plus grande variété de dispositifs, basés sur le même principe fondateur, pour s'approcher au mieux des besoins et des contraintes des domaines applicatifs. Contrairement aux idées reçues, cette démarche vers la mesure opérationnelle, parfois très contrainte, ne se fait pas au détriment de la performance. Bien au contraire, ces interféromètres à décalage multilatéral sont bien à l'état de l'art.

INTERFÉROMÉTRIE À DÉCALAGE LATÉRAL

Un principe simple...

Commençons par introduire le concept d'interférométrie à décalage latéral, concept dit auto-référent car il permet d'analyser un faisceau sans nécessité de le comparer à une onde étalon. Un des montages les plus simples est celui proposé par Ronchi dans les années 50, présenté ici dans une version idéale : le faisceau à analyser, pour l'instant considéré comme monochromatique à la longueur d'onde λ , est dirigé sur un réseau d'amplitude sinusoïdale pure, comprise entre -1 et 1, de pas p grand devant la longueur d'onde. Celui-ci diffracte deux répliques faiblement basculées d'un angle $\alpha = \frac{\lambda}{p}$ du faisceau suivant les ordres +1 et -1, comme indiqué en figure 1. Après propagation, ces répliques basculées se séparent latéralement et leur interférence est enregistrée sur un détecteur matriciel. Si le faisceau analysé est sans défaut, la figure d'interférence est constituée de franges linéaires régulières. Le passage d'un maximum à son voisin dans le réseau de franges correspond à une différence de marche de $\lambda/2$ entre les deux répliques basculées et décalées.

Si maintenant le faisceau analysé est de la forme $\exp\left(\frac{2i\pi}{\lambda}\Delta(x, y, \lambda)\right)$, uniforme en amplitude pour simplifier les expressions, où $\Delta(x, y, \lambda)$ est un défaut de différence de marche à mesurer, l'intensité $I(x, y, \lambda)$ obtenue après interférence des répliques et propagation à une distance d , s'exprime comme suit :

$$I(x, y, \lambda) = \left| \exp\left(\frac{2i\pi}{\lambda}\left(ax + \Delta\left(x - \frac{\lambda d}{p}, y, \lambda\right)\right)\right) + \exp\left(\frac{2i\pi}{\lambda}\left(-ax + \Delta\left(x + \frac{\lambda d}{p}, y, \lambda\right)\right)\right) \right|^2$$

En développant cette expression, on obtient :

$$I(x, y, \lambda) = 2 \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\left(2ax + \left[\Delta\left(x - \frac{\lambda d}{p}, y, \lambda\right) - \Delta\left(x + \frac{\lambda d}{p}, y, \lambda\right)\right]\right)\right) \right]$$

On reconnaît là la forme classique en $\cos(ax + b(x, y))$ d'une modulation de phase. Les répliques basculées de l'onde analysée interfèrent donc suivant une porteuse de période $\frac{\lambda}{2\alpha}$. La modulation produite permet de coder le taux d'accroissement de la différence de marche pour une longueur d'onde donnée. Celle-ci sera extraite en tout point de la surface par une simple technique de démodulation.

Des propriétés chromatiques remarquables ...

En tenant compte de la loi des réseaux, donc en remplaçant α par $\frac{\lambda}{p}$, l'expression de l'intensité se simplifie comme suit :

$$I(x, y, \lambda) = 2 \left[1 + \cos\left(\frac{4\pi}{p}x + \frac{2\pi}{\lambda} \left[\Delta\left(x - \frac{\lambda d}{p}, y, \lambda\right) - \Delta\left(x + \frac{\lambda d}{p}, y, \lambda\right) \right] \right) \right]$$

La porteuse ne dépend donc pas de la longueur d'onde, mais seulement du pas du réseau. Cette propriété est importante à deux titres : tout d'abord, lorsqu'on change de longueur d'onde, on n'affecte en rien le dispositif qui garde la même porteuse donc le même traitement de démodulation. Cela permet également de travailler avec une source blanche sans que les franges ne se brouillent.

Considérons maintenant le taux d'accroissement $\Delta\left(x - \frac{\lambda d}{p}, y, \lambda\right) - \Delta\left(x + \frac{\lambda d}{p}, y, \lambda\right)$.

Si la différence de marche est continue, et que le décalage latéral est suffisamment petit, elle peut être développée au premier ordre en suivant l'approximation de ●●●

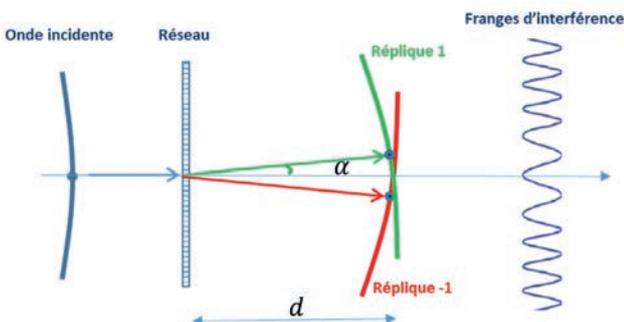


Figure 1.
Principe de l'interférométrie à décalage latéral.

nobrainner.



Lasers for Neuroscience

Perfect solution for 2-photon Microscopy

FemtoFiber ultra

780 / 920 / 1050 nm

- Fully turn-key with integrated AOM and GDD
- No noise-stress for animals thanks to fully air-cooled design
- Compact laser design saving valuable table space
- Low cost of ownership using robust & reliable fiber-laser technology

learn more...



 **TOPTICA**

Taylor ; le taux d'accroissement s'exprime alors comme suit :

$$\Delta\left(x - \frac{\lambda d}{p}, y, \lambda\right) - \Delta\left(x + \frac{\lambda d}{p}, y, \lambda\right) \approx \frac{2\lambda d}{p} \frac{\partial \Delta}{\partial x}(x, y, \lambda)$$

Le terme en λ se factorise et disparaît lors de la multiplication par $\frac{2\pi}{\lambda}$. L'intensité devient alors :

$$I(x, y, \lambda) \approx 2\left[1 + \cos\left(4\pi\left(\frac{d}{p} \frac{\partial \Delta}{\partial x}(x, y, \lambda) + \frac{x}{p}\right)\right)\right]$$

Pour peu que la différence de marche à mesurer soit elle-même achromatique, comme c'est le cas par exemple pour les défauts d'un miroir, la mesure devient alors parfaitement indépendante de la longueur d'onde. Cela ouvre la perspective d'une mesure quel que soit le spectre de la source et donc de manière très favorable pour les mesures *in situ*, sur banc d'essai ou pour les applications faibles flux.

Un point important est que cette propriété d'achromatisme complet, porteuse et mesure, n'est valable que pour les surfaces continues et pour un décalage latéral petit. Si l'objet de phase à analyser présente des ruptures, c'est-à-dire que la différence de marche $\Delta(x, y, \lambda)$ n'est plus dérivable et présente des discontinuités ou des sauts qui ne permettent plus l'approximation de Taylor, la porteuse restera achromatique mais la mesure deviendra chromatique. Cela se traduira par une discontinuité dans la modulation de phase codée dans les franges d'interférence, dont l'amplitude donnera directement accès à la hauteur de la discontinuité de la différence de marche à mesurer. Cette mesure sera cette fois dépendante de la longueur d'onde utilisée.

On se retrouve donc face à un dispositif qui a une aptitude naturelle à distinguer les sauts au comportement chromatique des défauts lents de type surface au comportement achromatique, et ceci par la simple comparaison d'acquisitions faites à deux longueurs d'onde distinctes. Cette propriété a permis de mettre au point un analyseur adapté au cophasage des télescopes segmentés en présence de turbulence atmosphérique [3]. Comme cette dernière peut être considérée au premier ordre comme achromatique, la comparaison d'acquisitions à deux longueurs d'onde distinctes permet d'extraire les seuls sauts dus aux discontinuités entre les segments, sans être pollué par la contribution de l'atmosphère.

...vers l'interférométrie à décalage multi-latéral

Le procédé décrit précédemment permet l'estimation du gradient de la différence de marche dans une seule direction. Même s'il est théoriquement possible de reconstruire la différence de marche par simple intégration d'une dérivée, cette étape se révèle en pratique instable et peu résistante face à une mesure forcément bruitée. Afin de contrôler la propagation de l'erreur lors de la reconstruction, il convient de mesurer au moins deux dérivées suivant des directions orthogonales. Plusieurs laboratoires ont donc réalisé des dispositifs couplant par une séparatrice deux interféromètres à décalage latéral orthogonal.

La solution optimale pour répondre à cette problématique est de changer le procédé exposé ci-dessus en remplaçant le

réseau sinusoidal linéaire par un réseau bi-dimensionnel, qui va donc diffracter des ordres dont les vecteurs d'onde ne seront plus coplanaires. La base de l'interférométrie à décalage multi-latéral est alors posée. La figure 2 présente le dispositif le plus répandu, à savoir l'interféromètre à décalage quadrilatéral (IDQL, souvent appelé QWLSI ou QLSI en anglais, pour QuadriWave Lateral Shearing Interferometer) qui va nous servir pour illustrer les nouvelles propriétés associées à ce nouveau mode de fonctionnement. En partant d'un réseau cartésien bi-sinusoidal en amplitude, on diffracte quatre ordres dont les extrémités des vecteurs d'onde appartiennent à un même cercle. Le principe de fonctionnement reste cependant le même que le montage de Ronchi présenté précédemment, à ceci près qu'il est extrapolé sur les deux dimensions x et y du plan.

Les quatre ordres diffractés, également inclinés par rapport à l'axe d'un angle α , vont donc prendre le même retard lors de leur propagation, ce qui assure l'invariance de la modulation qu'ils produisent, à savoir un réseau de spots répartis sur un maillage carré. La conséquence est qu'il va maintenant être possible de mesurer les dérivées de différence de marche, non seulement dans les deux directions x et y du plan, mais également dans les directions diagonales à partir d'un même dispositif. Plutôt que de multiplier les interféromètres, on multiplexe ici l'information sur un même interférogramme et on conserve les propriétés de chromatisme et d'achromatisme de l'interférométrie à décalage latéral simple.

L'élément clé est le réseau bi-dimensionnel qui doit non seulement diffracter les quatre ordres de même inclinaison et de même amplitude, mais surtout ne pas diffracter d'ordres supplémentaires qui viendraient perturber à la fois l'invariance par propagation et ajouter des franges parasites. Classiquement, on utilise une très bonne approximation du réseau idéal, en associant un damier de phase qui vient coder le signe de la transmittance bi-sinusoidale et un masque de trous d'ouverture égale à deux tiers de son pas [4]. Si on regarde une coupe du profil de cette transmittance dans une des directions principales, on voit qu'on obtient une bonne approximation d'un sinus. C'est ce dispositif, constitué d'un simple réseau placé devant une caméra, qui fait la totalité des développements industriels.

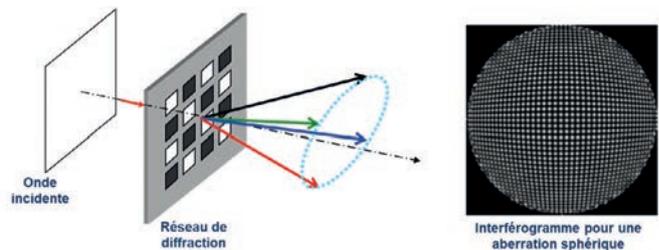


Figure 2. Schéma de principe de l'interféromètre à décalage quadrilatéral et interférogramme.

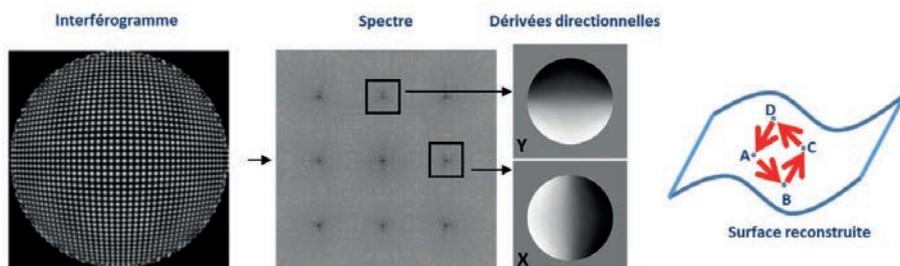


Figure 3. À gauche, figure d'intensité issue d'un interféromètre à décalage quadrilatéral pour un faisceau comportant une aberration sphérique, au centre, sa transformée de Fourier ainsi que les dérivées extraites à partir de deux harmoniques. À droite, illustration des relations de clôture des dérivées.

UN TRAITEMENT DE FOURIER NATUREL

La transformée de Fourier de l'interférogramme produit, présentée en figure 3, est donc constituée de huit harmoniques placées autour d'une harmonique zéro. On voit ici le caractère multiplex : chaque couple d'harmoniques correspondant à une sinusoïde sur une direction peut être démodulé pour donner le gradient dans cette direction. On obtient ainsi l'équivalent de quatre interféromètres à décalage latéral, qui fonctionneraient suivant les directions x , y , $x+y$, et $x-y$.

On reconstruit la cartographie de phase en tenant compte au mieux de ces différentes dérivées, essentiellement redondantes. La plupart des acteurs du domaine utilise une méthode aux moindres carrés pondérés pour minimiser l'impact du bruit de mesure.

Une des conséquences de l'évaluation de multiples dérivées est que la mesure est auto-référente en termes d'évaluation de l'erreur. Pour cela, on utilise ce qu'on appelle les relations de clôture. Prenons par exemple le cas de deux dérivées en x et y , obtenues suivant un maillage cartésien. Si on regarde un point de la surface d'onde à reconstruire (figure 3, droite), on voit qu'on peut faire une circulation : on prend la valeur de la dérivée en x pour se propager du point A au point B, puis la valeur de la dérivée en y pour monter du point B au point C, moins la dérivée en x entre

les points C et D, et enfin, moins la dérivée en y pour revenir au point d'origine A. Comme la mesure est entachée d'un certain bruit, la position de retour ne sera pas strictement superposée avec l'origine. En estimant de façon systématique ces circulations en tous points de la surface reconstruite, il est donc possible de déduire une cartographie des écarts-type de l'erreur de mesure des dérivées à partir de la mesure elle-même [5].

LES APPLICATIONS

L'année 2023 a été l'occasion de la première rencontre française d'interférométrie à décalage multilatéral française (proceeding colloque idml 2023 : <https://urlz.fr/oRIH>), car, même s'il y a des développements importants maintenant en Chine, en Allemagne ou en Australie, il se trouve que l'essentiel de l'innovation sur ce thème est concentré en France.

Les propriétés d'achromatisme évoquées ci-dessus ont été à l'origine de la diffusion de la technique et ceci dans le domaine des lasers impulsionsnels, avec les travaux pionniers du LULL, soutenus par Gérard Mourou au CUOS, Michigan, et de l'Institut d'Optique. Puis une grande activité s'est développée autour de l'Institut Fresnel avec comme thématique majeure la biologie [6]. Les microscopistes de cet institut se sont intéressés aux propriétés de cohérence spatiale de la source d'éclairage. Ils ont ●●●

AR / VR : Un nouveau débouché pour l'interférométrie à décalage multilatéral

Dans l'ère contemporaine où la technologie s'entrelace de plus en plus avec le tissu social, la réalité augmentée (AR) et la réalité virtuelle (VR) émergent comme des forces motrices qui élargissent les horizons de notre réalité quotidienne. Ces technologies révolutionnaires ne sont pas seulement des concepts futuristes, l'AR/VR se présente aujourd'hui comme un atout inestimable pour les enjeux industriels tels que la santé, la formation, la simulation mais aussi pour le grand public avec l'éducation, le tourisme et le divertissement. Les systèmes AR/VR sont de véritables condensés de haute technologie photonique, incluant des métasurfaces complexes, des écrans miniatures, des optiques microscopiques et des free-forms. Répondre à ce défi de fabrication et conception exige des solutions de mesure qui transcendent les normes. PHASICS,

pionnier de l'excellence métrologique, offre des solutions complètes de métrologie optique, englobant la caractérisation du système final et de chacun de ses sous-ensembles. Les systèmes de la gamme KALEO sont achromatiques, assurant une précision uniforme sur tout le spectre visible, tandis que leur conception versatile garantit la mesure dans toutes les configurations imaginables. Que le faisceau soit collimaté ou divergent, avec ou sans polarisation, PHASICS offre la clé pour contrôler les performances et la qualité des systèmes AR/VR à la pointe de l'innovation. ●

PHASICS | Tel: +33 (0)1 80 75 06 33
contact@phasics.com – www.phasics.com



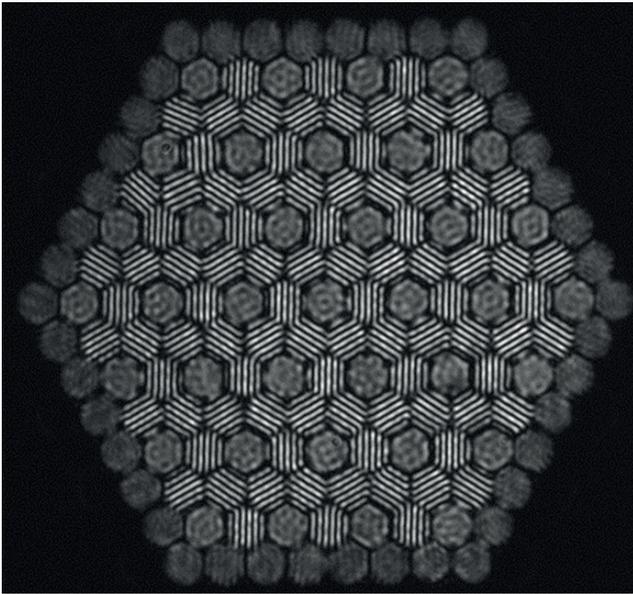


Figure 4. Interférogramme PISTIL obtenu expérimentalement sur un miroir segmenté. Pour tenir compte de la géométrie hexagonale des segments, le réseau de l'interféromètre diffracte ici 6 ondes et le décalage latéral a été maximisé à la taille d'un segment, possibilité offerte par l'hypothèse de segments élémentaires parfaits.

ainsi découvert de nouveaux dispositifs qui permettent d'ajouter la troisième dimension dans l'imagerie de phase et de faire des coupes longitudinales à partir d'un seul enregistrement. Les applications biologiques marquent aussi une rupture : plutôt que d'afficher des cartes de phase, les images de cellules sont directement quantifiées en taux de masse sèche, donnée directement interprétable par le biologiste. Ainsi, l'Institut Gustave Roussy a pu réaliser des avancées importantes en biologie cellulaire en s'appuyant sur les travaux de l'Institut Fresnel et des Universités de Limoges et Bordeaux. Pour ce même thème, l'imagerie très haute résolution permet d'identifier directement les virus présents dans des éprouvettes et de donner une évaluation de leur concentration. Une innovation en développement chez Phasics permettra bientôt de fournir des cartographies instantanées de phase sur plusieurs millions de pixels, pour des cadences adaptées à une observation du vivant.

L'instrument PISTIL (piston and tilt interferometer) illustre parfaitement l'évolution extrême de l'interférométrie à décalage multilatéral pour une réponse optimisée à un besoin très spécifique : les surfaces morcelées. L'exemple emblématique de ce type de surface est le télescope James Webb, constitué par l'association de miroirs hexagonaux. Pour assurer que les éléments d'un miroir segmenté sont bien disposés, avec une qualité compatible d'une imagerie en visible, il est nécessaire de retrouver et de compenser les différences de hauteur entre les segments. Ceci serait bien entendu possible avec un interféromètre quadrilatéral classique. Toutefois une stratégie proposée par l'Onera, dans la suite de travaux effectués avec Thales R&T, a été de développer un nouveau dispositif dédié qui profite d'informations connues

a priori : la géométrie hexagonale régulière des défauts à mesurer et la qualité optique des segments élémentaires. Il est alors possible d'améliorer le signal-à-bruit des seules informations recherchées : les hauteurs relatives et les basculements présents entre les segments. La figure 4 montre à quel point les franges d'interférence ont évolué. Pour s'assurer de la bonne qualité de ce nouveau type d'interféromètre, une comparaison en aveugle a été réalisée avec le « phase shifting interferometer » du LAM à Marseille, instrument de référence pour l'analyse de ces surfaces segmentées. Les résultats de mesure des hauteurs relatives obtenues sont comparables à quelques nanomètres près en absolu, soit $\lambda/200$, démontrant encore une fois que l'adéquation au besoin peut être faite en préservant la performance [7].

Pour finir sur les applications, revenons sur l'image mystérieuse présentée en début de cet article : il s'agit de la radiographie de phase d'un coléoptère réalisée par interférométrie à décalage multilatéral en rayons X. Cette image a été réalisée au synchrotron Soleil, lors d'une collaboration entre l'Onera et la Ligne Métrologie et Test. Ce domaine des rayons X est extrêmement prometteur ; en effet, l'imagerie de phase permet une analyse améliorée des matériaux à faible absorption comme les tissus vivants, avec des doses plus faibles que pour l'imagerie classique. À ces deux acteurs s'ajoutent le CEA/LIST et le CNRS/LP3 qui investissent eux aussi beaucoup dans ces méthodes en rayons X pour mettre au point le contrôle non destructif dynamique des matériaux du futur du domaine aérospace.

CONCLUSION

Comprendre l'interférométrie à décalage multilatéral, c'est comprendre l'évolution naturelle des méthodes d'analyse optique pour aller au plus près des objets d'intérêt, en minimisant l'impact sur leur environnement. Le procédé fondamental est très simple, à savoir l'interférence de N répliques de l'onde à analyser produites par un réseau bi-dimensionnel. A partir de cette base, les utilisateurs vont chercher à produire de nouveaux dispositifs optimisés pour un besoin de mesure spécifique, en tenant compte des contraintes d'emploi et pour une performance donnée. La diversité des applications et les résultats obtenus dans des domaines extrêmement variés montrent tous les jours la pertinence de cette démarche. ●

RÉFÉRENCES

- [1] J. Primot, *Appl. Opt.* **32**, 6242 (1993)
- [2] J. Primot, L. Sogno, *J. Opt. Soc. Am. A* **12**, 2679 (1995)
- [3] B. Toulon *et al.*, *Opt. Commun.* **279**(2), 240 (2007)
- [4] J. Primot, N. Guerineau, *Appl. Opt.* **39.31**, 5715 (2000)
- [5] A. Stolidi *et al.*, *Opt. Express* **30**, 4302 (2022)
- [6] P. Bon *et al.*, *Opt. Express*, **17**(15), 13080 (2009)
- [7] B. Rouze *et al.*, *Opt. Express* **28**, 32415 (2020)

ACHETER UN ANALYSEUR DE TAILLE DE NANOPARTICULES PAR DIFFUSION DYNAMIQUE DE LA LUMIÈRE (DLS)

Hanna ANOP*, David JACOB*, Benoit MAXIT, Sylvain BOJ

Cordouan Technologies – 11 av. de Canteranne, 33600 Pessac

*hanna.anop@cordouan-tech.com; *david.jacob@cordouan-tech.com



La technique de diffusion dynamique de la lumière, couramment désignée sous l'acronyme anglais DLS (Dynamic Light Scattering), s'est rapidement imposée au fil des décennies comme la méthode de mesure prédominante dans les laboratoires pour l'analyse de la taille et de la distribution des nanoparticules en suspension dans des liquides.

<https://doi.org/10.1051/photon/202312355>

En raison de sa simplicité de mise en œuvre et de son coût d'achat relativement abordable, la DLS est devenue une méthode incontournable pour la caractérisation des systèmes colloïdaux (nanoparticules dispersées dans un liquide) ainsi que pour l'étude des milieux complexes en phase liquide. Dans cet article, nous explorerons les principes fondamentaux de la DLS et fournirons des conseils pratiques pour vous aider à choisir l'appareil qui correspond le mieux à vos besoins.

LES PRINCIPES DE BASE DE LA DLS

L'acquisition d'un analyseur de taille de nanoparticules par DLS représente souvent un investissement important pour les laboratoires, il est donc crucial de faire le bon choix d'équipement. Pour faire ce choix, il est nécessaire de bien comprendre les principes fondamentaux de cette technique.

Rappel sur les nanoparticules et le mouvement Brownien

Les nanoparticules (NPs) sont des objets dont les dimensions sont comprises typiquement entre 1 nm (10⁻⁹m) et quelques centaines de

nanomètres. En suspension dans un milieu liquide, les NPs sont animées d'un mouvement désordonné et aléatoire (mouvement Brownien [1]) provoqué par les collisions incessantes avec les molécules du liquide (voir figure 1). On peut associer à ce mouvement aléatoire un coefficient de diffusion D qui caractérise la capacité de diffusion de particules dans un solvant. Celui-ci est lié au déplacement de la particule par l'équation:

$$\langle X^2(t) \rangle \sim 2Dt \quad (1)$$

Grâce aux travaux d'Albert Einstein sur le mouvement Brownien publiés en 1905, il est possible d'établir ●●●

une relation simple et directe (**relation de Stokes-Einstein**) entre le coefficient de diffusion D , le diamètre hydrodynamique \varnothing_H des particules (supposées sphériques) et les propriétés du milieu liquide :

$$\varnothing_H = \frac{kT}{3\pi\mu D} \quad (2)$$

où μ est la viscosité du solvant, T la température de l'échantillon, et k la constante de Boltzmann.

PRINCIPE DE LA DLS

La DLS est une technique optique basée sur l'équation de Stokes-Einstein et qui utilise le mouvement Brownien comme une « signature » de la taille des particules en suspension par la mesure de leur coefficient de diffusion D .

Un dispositif de DLS classique est représenté sur le schéma de principe ci-dessous (Fig. 2): une source laser polarisée linéairement éclaire, à une longueur d'onde λ , l'échantillon contenant les nanoparticules en suspension; la lumière diffusée par les nanoparticules est ensuite collectée, selon un angle de diffusion θ connu, par un détecteur à comptage de photons de haute sensibilité. Cette lumière diffusée crée donc au niveau du détecteur l'équivalent d'une figure de «speckle» ponctuelle dont les fluctuations dynamiques sont corrélées aux propriétés du mouvement Brownien des particules.

En calculant la fonction d'autocorrélation du signal collecté, on peut accéder aux variations de phase de l'onde optique dues au déplacement des particules. Le processus d'une mesure DLS peut ainsi se décomposer schématiquement en trois étapes: (i) le détecteur mesure, à un angle donné, les fluctuations d'intensité de lumière diffusée dues au mouvement des particules; (ii) ce signal est ensuite traité numériquement pour générer une fonction d'autocorrélation en intensité, (iii) dans une dernière étape de traitement, des algorithmes mathématiques d'inversion permettent d'extraire de façon précise

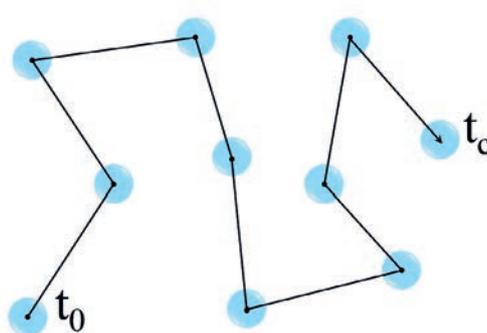


Figure 1. Représentation du mouvement Brownien

les distributions de taille (diamètre hydrodynamique) des particules. Dans le cas de particules animées d'un mouvement Brownien, la fonction d'autocorrélation peut s'exprimer de manière simplifiée sous la forme d'une (ou plusieurs) exponentielle(s) décroissante(s), comme indiqué dans l'équation (3):

$$G_2(\tau) = A + \beta \exp(-2q^2 D \tau), \quad (3)$$

où τ (μs) est un délai de corrélation, β est un terme de contraste/ amplitude, appelé parfois «intercept» lié à la configuration de mesure (facteur d'instrument) et aux propriétés de l'échantillon, q (cm^{-1}) est le vecteur d'onde de diffusion $q = \frac{4\pi n_0}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$.

Comme le montre l'équation (3), le temps de relaxation du corrélogramme est lié au coefficient de diffusion. Ce dernier peut ainsi être déterminé à partir du corrélogramme expérimental au moyen d'algorithmes mathématiques dits d'inversion. La connaissance de ce coefficient de diffusion permet alors de remonter au diamètre hydrodynamique des NPs via l'équation de Stokes-Einstein eq. 2. À noter que pour chaque population de particules distinctes, on peut associer un coefficient de diffusion D . Le corrélogramme est alors constitué d'une somme d'exponentielles décroissantes.

L'algorithme d'inversion le plus connu et le plus utilisé dans la

littérature est l'algorithme des Cumulants. Il repose sur un modèle mono-exponentiel qui permet de déterminer un diamètre hydrodynamique moyen (le z-average) et un indice de polydispersité (PDI). Cet algorithme est décrit et recommandé dans la norme ISO13321 [2]. Aussi on le retrouve dans tous les instruments DLS commerciaux. Dans le cas d'échantillons présentant plusieurs populations de particules, sont proposés des algorithmes mathématiques plus complexes adaptés aux cas polymodaux: CONTIN, NNLS (Non Negative Least Square), SBL (Sparse Bayesian Learning), maximum entropie, etc. Ils utilisent des calculs matriciels, des techniques de régularisation et des méthodes d'inversion de Laplace, combinant des approches statistiques et analytiques. Ils sont ainsi conçus pour décrire très précisément l'ensemble de la distribution en taille d'un échantillon.

CHOISIR SON INSTRUMENT DE DLS

Aujourd'hui une dizaine de fabricants/fournisseurs sont référencés sur le marché des instruments de DLS (voir tableau des principaux fournisseurs en France en fin d'article), chacun proposant des solutions avec des spécificités techniques propres. Aussi, avant de faire votre choix, il est très important de bien identifier votre besoin en fonction de différents critères en lien avec vos applications tels que : gamme de taille des particules, propriétés physico-chimiques des échantillons (concentration, absorption, opacité, fluorescence, viscosité, nature du solvant, etc.), volume d'échantillon, usage de l'instrument (contrôle de routine, recherche scientifique avancée, outils pédagogique etc.), contraintes d'utilisation spécifiques à votre application (expériences en température ou sous atmosphère contrôlée, mesure déportée et/ou sans contact, couplage instrumental etc.), ergonomie matérielle et logicielle, et enfin votre budget d'achat!

Configuration de mesure

On trouve aujourd'hui deux grandes catégories d'instruments de DLS commerciaux selon leur configuration de mesure: la plus répandue dans les laboratoires est la version dite «de paillasse», à angle fixe. Ces instruments sont relativement compacts et sont conçus pour être utilisés par des utilisateurs experts ou non-experts, avec des réglages automatiques, peu de maintenance et une prise en main simple.

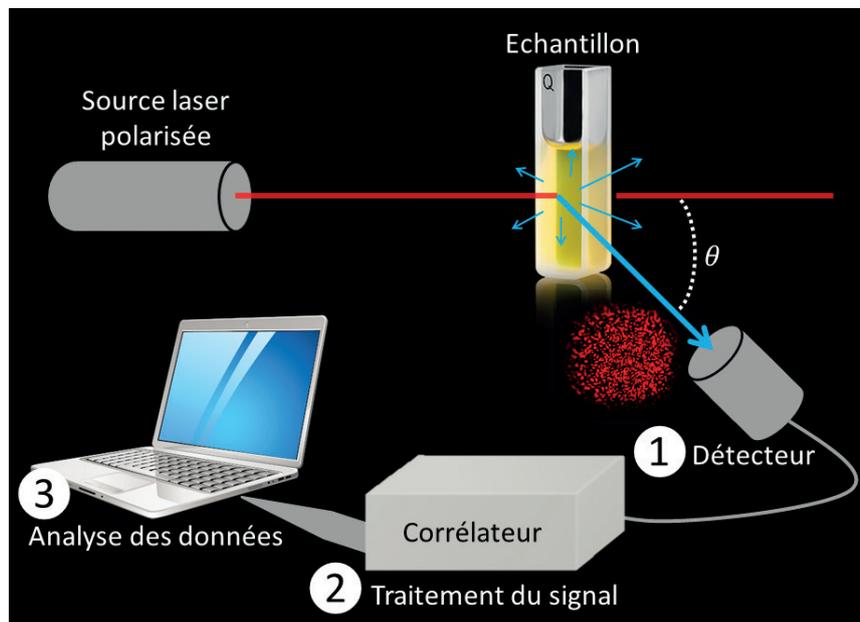
La deuxième catégorie d'instruments, dédiée généralement aux applications scientifiques avancées, concerne les bancs de diffusion de lumière statique et dynamique DLS/SLS à angle de détection variable avec goniomètre. Cette deuxième catégorie d'instrument, historiquement plus ancienne mais beaucoup moins répandue, s'adresse plutôt à des utilisateurs avertis car elle nécessite des réglages optiques précis et une maintenance plus importante. L'encombrement de ces bancs est également beaucoup plus important que les instruments de paillasse puisque qu'ils sont montés sur des tables optiques dédiées avec un environnement de protection laser.

A noter que quelques fournisseurs proposent également des solutions de DLS à angle variable intégrées avec mini goniomètre en format paillasse.

Environnement échantillon

Dans la configuration de paillasse (voir exemple figure 4), l'échantillon est généralement versé dans une cuvette de section carrée (10×10mm) en plastique transparent ou en verre/quartz placée dans un réceptacle contrôlé en température à l'intérieur de l'appareil. La détection de la lumière diffusée peut se faire selon différents angles; la configuration de mesure à 90° (par rapport au faisceau transmis) utilisée historiquement sur les premiers appareils de DLS reste la plus répandue aujourd'hui. Cependant, cette configuration ne permet pas de mesurer des échantillons concentrés et/ou opaques, obligeant à fortement diluer l'échantillon avant la mesure. Pour pallier à cette limitation, une alternative consiste à mesurer l'échantillon en rétrodiffusion. Ainsi, les appareils de DLS modernes proposent désormais une configuration de mesure avec un ou deux (voire trois) angles de détection entre 90° et 175°. Dans le cas d'échantillons très absorbants, une alternative efficace consiste à mesurer l'échantillon en couche mince grâce à une cellule de mesure intégrée et un dispositif de contrôle de l'épaisseur de l'échantillon (voir figure 4 - centre).

Figure 2. Schéma de principe d'un instrument de DLS



cam²

**M² METER AS
EASY & QUICK
AS A BEAM
PROFILER**

Compact

**Live
measurement**

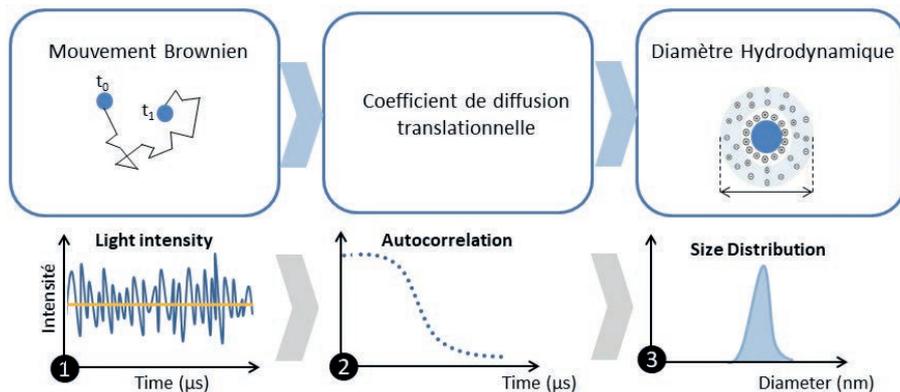
**Alignment
free**

ISO 11 146

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

www.imagine-optic.com





Dans le cas des bancs de DLS/SLS à goniomètre, l'échantillon est placé dans un tube cylindrique en verre de quelques mm de diamètre. Le tube est immergé dans un bac à reprise d'indice contenant un liquide d'indice de réfraction adapté à celui du verre, typiquement du toluène ou de la dodécaline, afin de minimiser les diffusions et réflexions parasites dans la zone de mesure. L'angle de diffusion peut varier continuellement dans une gamme ajustable comprise entre 30° et 160° typiquement.

On peut souligner qu'outre ces deux configurations d'environnements échantillons, deux fournisseurs proposent également des instruments équipés de sonde de mesure déportée par fibre optique qui fonctionne soit par immersion dans l'échantillon, soit *in situ* et sans contact avec l'échantillon (voir figure 5).

L'intérêt de cette dernière configuration est de pouvoir faire des mesures à distance et dans des environnements confinés (autoclave, seringue, réacteur de synthèse, capillaire de

Figure 3. Les trois étapes clés d'une mesure de DLS: acquisition ❶, corrélation ❷, inversion ❸.

fluidique) sans prélèvement ni manipulation de l'échantillon, ouvrant ainsi la possibilité de suivi en ligne et de contrôle de procédé.

Gamme de tailles des particules

Elle est généralement comprise entre 1 nm et 5 - 10 μ m en fonction des propriétés des échantillons ; la limite basse est fixée par la sensibilité du détecteur, par le contraste d'indice de réfraction entre les particules et la phase liquide et la concentration en particule. La limite de taille

Figure 4. Exemples d'instruments commerciaux de DLS: à gauche, système de « paillasse » à cuvette; au milieu, système avec cellule de mesure intégrée et mesure en film mince d'épaisseur contrôlable (DTC). ; à droite bancs de DLS/SLS à angle variable avec goniomètre.

supérieure, associée aux effets de sédimentation, dépend du contraste de densité entre les particules et la phase liquide.

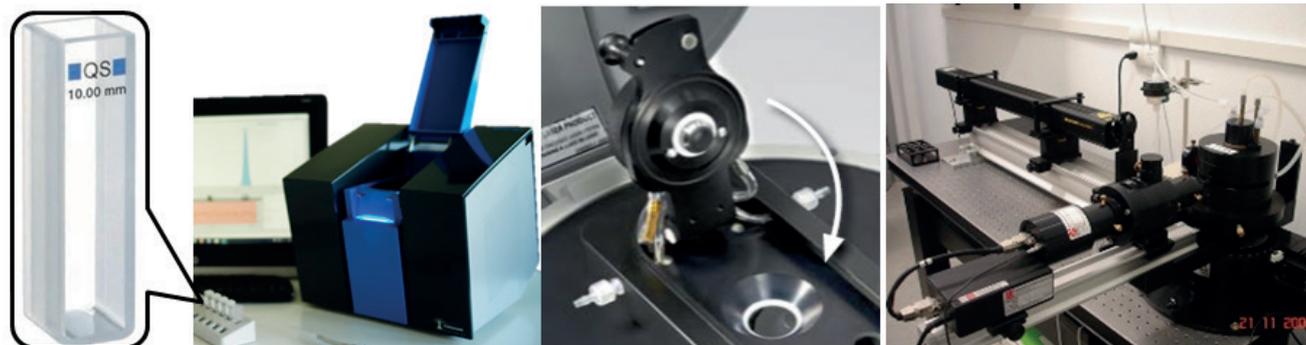
Gammes de température échantillon

Pour les appareils de paillasse, le contrôle de la température se fait par des modules Peltier placés sous le support de cuvette. Cette technologie permet de proposer des gammes de températures généralement comprises entre 5°C et 70°C-80°C voire 110°C pour certains modèles.

Dans le cas des bancs de DLS/SLS, l'environnement échantillon (bac à reprise d'indice) est thermalisé par une circulation d'eau en circuit fermé. Les gammes de températures, +/- 10°C autour de l'ambiante, sont donc beaucoup plus restreintes qu'avec les Peltiers.

Source laser

Historiquement, les premiers instruments de DLS commerciaux utilisaient des lasers Helium/Neon (He-Ne) à 633 nm du fait de leur stabilité, de leurs propriétés spectrales bien adaptées à la DLS et de leur maturité technologique. On retrouve encore aujourd'hui ce type de laser dans de nombreux modèles. Cependant, depuis quelques années, ces lasers He-Ne sont progressivement remplacés par des sources lasers à semi-conducteur stabilisés en fréquence beaucoup plus compacts et plus puissants, avec des caractéristiques spectrales comparables aux lasers He-Ne. La longueur d'onde du



ANALYSEUR DE NANOPARTICULES **ACHETER**

laser est un point important à prendre en considération si vos échantillons présentent des bandes d'absorption/émission dans le spectre visible (ex quantum dots, fluorescéines, échantillons avec marqueurs fluorescents, etc.). Typiquement les instruments de DLS commerciaux utilisent des lasers émettant dans le rouge avec des longueurs d'onde comprises entre 630 nm et 660 nm. Dans ces cas-là, cette longueur d'onde peut ne plus être adaptée. Certains fournisseurs proposent ainsi des longueurs alternatives comme 532 nm (vert) ou 785 nm (proche IR) plus adaptées aux propriétés spectrales des échantillons à mesurer.

Détecteur : APD vs PMT

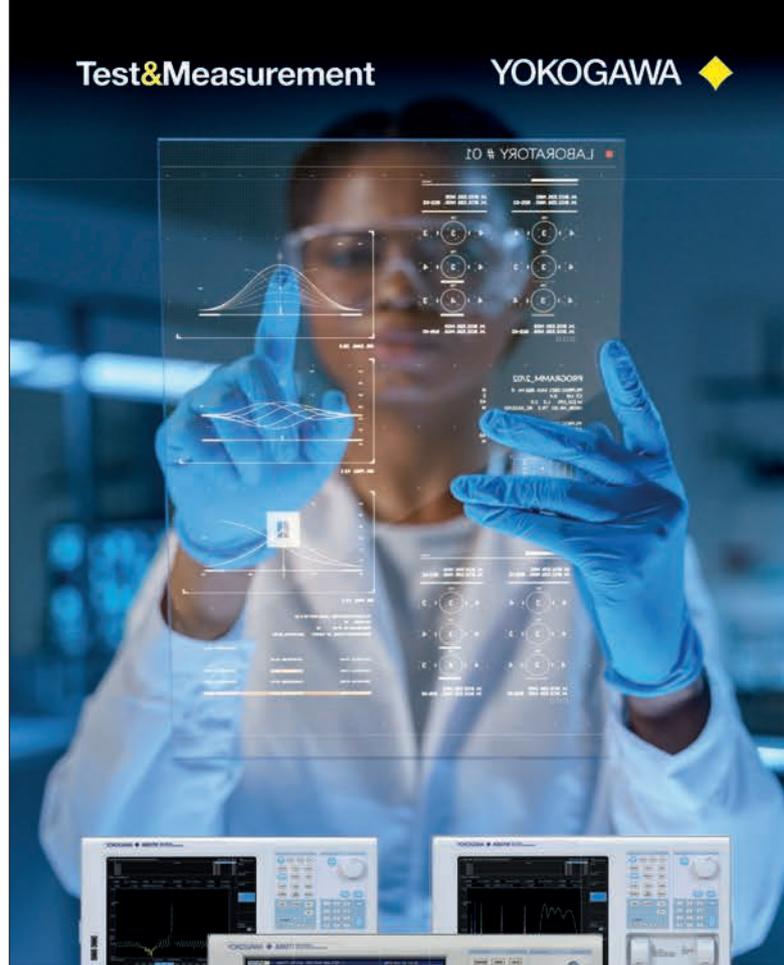
Le détecteur est un élément important de la chaîne de détection d'un instrument de DLS. Les premiers systèmes utilisaient des détecteurs à comptage de photon très sensibles de type Photomultiplicateur (PMT). Si ces détecteurs sont encore utilisés dans quelques modèles, les instruments de DLS modernes utilisent majoritairement des photodiodes à avalanches (APD) de hautes sensibilités. Plus faciles à mettre en œuvre que les PMTs, les APDS présentent un gain d'amplification plus élevé d'un facteur 10 et une plus grande dynamique de mesure que les PMTs. Par ailleurs les APDS sont moins sensibles aux effets parasites tels que l'Afterpulse ou le risque d'endommagement en cas de surexposition à la lumière.

Le logiciel

Un instrument de DLS doit être piloté par un logiciel dédié. Fourni par la plupart des fabricants, celui-ci est parfois accessible depuis une interface intégrée à l'instrument, mais plus généralement, il s'exécute depuis un PC connecté à l'équipement. Essentiel pour le traitement des données de mesure et l'exploitation des résultats, le logiciel et son Interface Homme Machine (IHM) doivent également être pris en considération dans votre choix d'équipement.

On rencontre différentes philosophies de logiciel selon les fabricants avec, en particulier, des interfaces plus ou moins ouvertes proposant des niveaux de paramétrage très différents : certaines IHM se présentent comme des «boîtes noires» avec un mode de fonctionnement entièrement automatisé et un processus de mesure relativement masqué pour l'utilisateur. D'autres IHM sont à l'inverse très ouvertes et permettent un contrôle poussé des paramètres de mesure et d'analyse. Elles nécessitent néanmoins une plus forte implication de la part de l'opérateur.

Évaluez également bien l'ergonomie du logiciel. Une interface conviviale simplifie l'acquisition, l'analyse et la génération de rapports de données. Bien conçue, elle peut accroître votre productivité et votre efficacité. Examinez les capacités d'analyse de données du logiciel ainsi que le nombre de licences incluses avec votre instrument, vérifiez la possibilité d'accéder à vos données et les analyser sans devoir être connecté à l'appareil. En fonction ●●●



Discover our range of Optical Spectrum Analyzers

World-class optical performance for wellbeing, biomedical, and environmental sensing applications.

In cooperation with:



www.wavetel.fr
about@wavetel.fr

Discover it here:



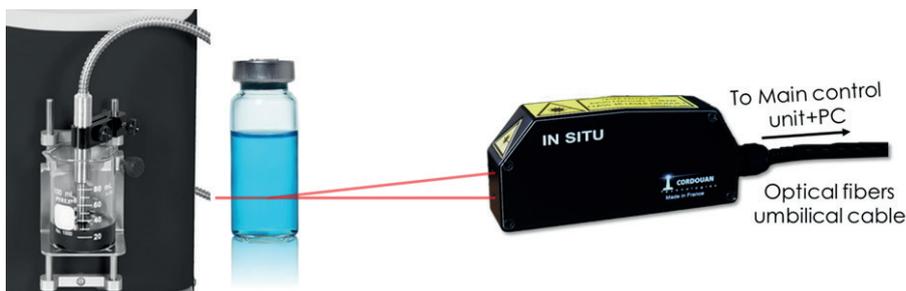


Figure 5. Solution de sonde mesure déportée par fibre optique immergeable (gauche) ou *In situ* et sans contact (droite)

de vos objectifs de recherche, vous pourriez également avoir besoin de fonctionnalités avancées telles que l'analyse multimodale, la visualisation des données en temps réel ou la personnalisation des algorithmes de traitement des données. Si vous envisagez d'intégrer les données DLS avec d'autres logiciels ou systèmes de gestion de données (par exemple, des logiciels d'analyse de données ou des systèmes de gestion d'informations de laboratoire), vérifiez que le logiciel DLS facilite l'export des données. Enfin, assurez-vous que le logiciel dispose d'un support technique fiable et qu'il propose des mises à jour régulières pour améliorer ses fonctionnalités et résoudre d'éventuels problèmes.

Services: formation, garantie, assistance technique & maintenance

Il est important de vérifier les conditions de garanties proposées par les fabricants. Pour les équipements usuels de laboratoires la durée de garantie est généralement de 12 mois ; cependant, depuis quelques années la période de garantie des appareils de DLS est désormais proposée à 24 mois en standard. Des extensions de garantie sont possibles dans le cadre d'un contrat de maintenance. Certains systèmes de DLS nécessitent plus d'entretien que d'autres. Renseignez-vous sur les conditions de maintenance, la fréquence des calibrations/vérifications, la disponibilité des pièces de rechange et le niveau de formation requis pour l'utilisation et l'entretien de l'appareil. Assurez-vous que le fournisseur propose un support technique fiable et

prenez en considération le coût de ces services.

Budget

Le dernier point et non des moindres, votre budget d'investissement ! Le prix d'un appareil de DLS dépend beaucoup de ses fonctionnalités, de ses performances et, dans une moindre mesure, de son fabricant. Ainsi, il faut compter sur un prix d'environ 25-30k€ pour les appareils de DLS d'entrée

de gamme (mesure à 90°) et jusque à 80-100 k€ pour les instruments les plus sophistiqués (mesures multi angles, bancs DLS/SLS). Assurez-vous que votre budget d'achat soit bien ajusté par rapport à vos besoins, en évitant de payer pour des fonctionnalités spécifiques inutiles pour vos applications.

CONCLUSIONS

Compte tenu de la grande diversité d'instruments de DLS disponibles sur le marché aujourd'hui, le choix du meilleur instrument pour vos applications peut s'avérer difficile pour un utilisateur non averti. Cet article présente les principaux éléments techniques et fonctionnels à prendre en considération pour vous aider à faire le bon choix. Dans cette démarche, il est fortement recommandé d'engager un dialogue avec les fournisseurs/fabricants pour bien préciser votre besoin afin qu'ils puissent vous orienter vers la solution qui correspond le mieux à vos exigences et vos contraintes. ●

RÉFÉRENCES

- [1] Richard Feynman, "The Brownian Movement". The Feynman Lectures of Physics, Volume I. p. 41 (1964).
- [2] ISO 13321:1996 Particle size analysis — Photon correlation spectroscopy.

FOURNISSEUR	SITE INTERNET	TYPES D'ANALYSEURS DLS PROPOSÉS
ALV GmbH (Allemagne)	www.alvgmbh.de	• Banc DLS/ SLS à goniomètre
Anton Paar (Autriche)	www.anton-paar.com	• DLS de paillasse multi-angles fixes (MADLS)
Cordouan Technologies (France)	www.cordouan-tech.com	• DLS de paillasse à angle fixe • DLS déportée <i>in situ</i> sans contact; mesure en ligne • DLS & DDLS de paillasse à angle variable avec mini goniomètre.
Horiba (Japon)	www.horiba.com	• DLS de paillasse multi-angles fixes (MADLS)
LS Instruments (Suisse)	www.lsinstruments.ch	• Banc DLS/ SLS à goniomètre • 3D X-corrélation DLS de paillasse
Malvern Panalytical (Royaume-Uni)	www.malvernpanalytical.com	• DLS de paillasse multi-angles (MADLS)
Microtrac MRB (Allemagne)	www.microtrac.com	• DLS de paillasse à angle fixe • DLS déportée <i>in situ</i> par immersion
Wyatt Technologies (USA)	www.wyatt.com	• System SLS multi-angles fixes MALS avec module DLS externe

Mesures de la couleur et de la luminance pour l'AR/VR



L'objectif de la caméra LumiTop 5300 AR/VR reproduit l'œil humain de la manière la plus réaliste possible et mesure la couleur et la luminance telles que les voit l'utilisateur. L'objectif droit est idéal pour tester les modules d'affichage AR/VR sur la ligne de production avant de les monter dans le casque.

https://www.instrumentsystems.com/fileadmin/Downloads/PressInformation/2023/2023-12_Photonics-West_EN_final.pdf

MODULATEUR SPATIAL DE LUMIÈRE LCOS

Le modulateur spatial de lumière (SLM) PLUTO-2.1 se compose d'une unité pilote et d'un modulateur de phase LCOS (cristaux liquides sur silicium) avec



une résolution full HD (1920 x 1080 pixels). L'adressage peut être effectué à l'aide du logiciel générateur de motifs fourni, du logiciel SLM Slideshow Player ou d'un logiciel de visualisation d'images standard.

<https://holoeye.com/products/spatial-light-modulators/pluto-2-1-lcos-phase-only-refl/>

Source de lumière large bande Vis-NIR



La nouvelle version de la source Chromatiq Spectral Engine™ (CSE) propose une extension au spectre proche infra-rouge ce qui lui permet de couvrir la gamme 380nm - 1100nm. Les fonctionnalités incluent la possibilité de programmer le spectre de la source en fonction des besoins.

<https://www.energetiq.com/chromatiq>

LOGICIEL POUR MESURE DU FRONT D'ONDE



PhaseStudio

PhaseStudio de Phasics est un logiciel dédié à la mesure du front d'onde. Ce nouveau logiciel inclut des

algorithmes optimisés pour une meilleure efficacité et une plus grande rapidité, des outils d'automatisation, ...

<https://www.phasics.com/en/product/phasestudio>

Module de modélisation multi-physique

COMSOL a sorti la version 6.2 de COMSOL Multiphysics®. Cette version comprend des solveurs multi-physiques améliorés et permet d'effectuer



jusqu'à 7 fois plus rapidement l'analyse BEM (Boundary Element Method) pour des modélisations en acoustique et l'électromagnétisme sur clusters.

<https://www.comsol.fr/release/6.2>

CONGRÈS
DE LA



01/05 juillet 2024

OPTIQUE

NORMANDIE

VENEZ À ROUEN

2024



www.sfoptique.org
rubrique congrès OPTIQUE