

Photoniques

LA LUMIÈRE ET SES APPLICATIONS

40 ANS SFO

Clubs et Commissions,
les forces vives de la SFO

FOCUS

La photonique
en Île-de-France

OSEZ L'OPTIQUE

Sol'Ex et l'imagerie
monochromatique solaire

COMPRENDRE

Le théorème de
réciprocité optique

DOSSIER

IMAGERIE HYPERSPÉCTRALE

- L'imagerie spectrale pour l'agriculture et les sciences végétales
- Exploiter les signatures de la matière grâce à l'imagerie hyperspectrale computationnelle
- Apports et défis de l'acquisition codée pour l'imagerie hyperspectrale

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-Debuisschert (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 : Août 2022
Routage : STAMP (95)



Éditorial



NICOLAS BONOD

Rédacteur en chef

Richesse spectrale

1974-Plateau de Coconino, Arizona. Deux scientifiques, Alexander Goetz et Michael Abrams, développent un imageur d'un genre nouveau. Leur objectif ? Tirer profit de la richesse du spectre solaire en mesurant la réflectance du sol terrestre sur la bande spectrale 0.4-2.5 μm . Ces travaux sont associés à la mission Landsat d'observation spatiale de la Terre, mission qui a permis de développer plusieurs générations d'imageurs multispectraux. A. Goetz et ses coauteurs définirent cette nouvelle technique d'imagerie dans un article publié en 1984 par ces mots "Hyperspectral refers to the multidimensional character of the spectral data set... The value of this technique lies in its ability to acquire a complete reflectance spectrum for each picture element (pixel) in the image." Cette définition s'applique encore aujourd'hui remarquablement bien aux travaux menés dans cette discipline. Embarquons ensemble dans cet univers du datacube et découvrons les derniers progrès réalisés dans ce domaine, qui n'a eu de cesse depuis ces travaux pionniers d'étendre ses domaines applicatifs, des missions spatiales à l'agriculture et à la microscopie.

Vous l'aurez certainement remarqué, la place accordée aux entretiens s'est accrue dans les derniers numéros. Ce choix est motivé par le souhait

de mettre en avant les hommes et les femmes qui s'engagent pour faire avancer la photonique, que ce soit dans le monde académique ou celui des entreprises. Ces entretiens illustrent la diversité des parcours et des expertises des scientifiques au spectre large et riche dont l'engagement et l'implication dans l'optique et photonique ont contribué à faire progresser si rapidement cette filière.

La revue se nourrit de la richesse des personnalités et des expertises des membres de son comité qui a accueilli de nouveaux membres ces derniers mois. Je remercie l'ensemble des membres du comité, nouveaux et anciens, qui identifient les thématiques les plus pertinentes en veillant au renouvellement des sujets abordés. Je remercie enfin les auteurs qui consacrent un temps précieux à la rédaction d'articles à la fois rigoureux, techniques et pédagogiques. Je vous invite à aller découvrir l'article "Comprendre la réciprocité optique" de ce numéro qui illustre parfaitement cet équilibre subtile. Ces articles font avancer les connaissances de la communauté de l'optique-photonique et participent à la formation des plus jeunes. Nous allons encore accentuer nos efforts afin de proposer des contenus attractifs et participer à l'information, la formation et la promotion de la photonique.



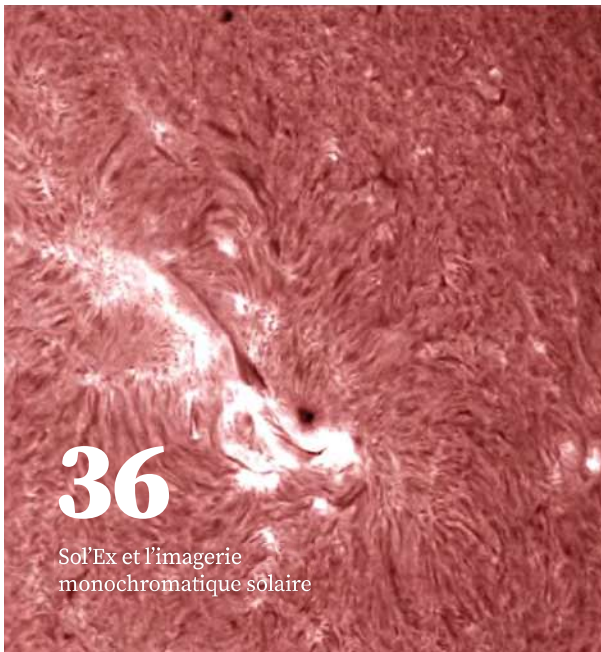
Sommaire

www.photoniques.com

N° 120

23

40 ANS DE LA SFO
Clubs et commissions,
les forces vives de la SFO

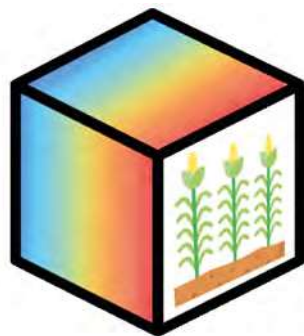


36

Sol'Ex et l'imagerie
monochromatique solaire

41

L'imagerie spectrale
pour l'agriculture
et les sciences végétales



ACTUALITÉS

- 03 Éditorial et actualité de la SFO
- 05 Informations partenaires
- 14 Mots-croisés sur le thème de l'imagerie hyperspectrale
- 15 Actualités scientifiques
- 18 Entretien : Pascale Senellart, CNRS
- 21 Témoignage d'entrepreneur : Mathieu Ribes, POP® Photonics Open Projects

40 ANS DE LA SFO

- 23 Clubs et Commissions, les forces vives de la SFO

FOCUS

- 28 La photonique en Île-de-France

OSEZ L'OPTIQUE

- 36 Sol'Ex et l'imagerie monochromatique solaire

DOSSIER : IMAGERIE HYPERSPECTRALE

- 41 L'imagerie spectrale pour l'agriculture et les sciences végétales
- 47 Exploiter les signatures de la matière grâce à l'imagerie hyperspectrale computationnelle
- 51 Apports et défis de l'acquisition codée pour l'imagerie hyperspectrale

COMPRENDRE

- 56 Comprendre le théorème de réciprocité optique

PRODUITS

- 61 Nouveautés

Annonces

2B Lighting 34
ARDOP 15
Comsol IV° de cov.
Edmund Optics 53

Edp Sciences 09, 17
EPIC II° de cov.
Exail 31
HTDS 34
HySpex 45

Imagine Optic 39
Opton Laser 33, 41
Polytec 35
Scientec 43
Sedi-Ati 35

Spectrogon 59
Trioptics 55

Crédit photo (couverture) : ©EDP Sciences.
Image de Nathalie Picqué et Theodor Hansch.
Image reproduite de Photoniques 113, 38-42 (2022).

L'édito de la SFO



ARIEL LEVENSON

Président de la SFO

Diffusons la lumière ensemble !

Nous continuons à célébrer les 40 ans de notre SFO avec un article dédié aux clubs et aux commissions. Ces quelques pages ne suffisent toutefois pas à rendre pleinement hommage aux nombreux collègues qui ont, tout au long de leur riche histoire, animé ses clubs, véritables cœurs battants de notre SFO. Cela me rassure de penser qu'à travers leurs actions ils sont, selon l'affinité de chacun, plutôt bien connus de notre communauté. Mais ... connaissez-vous nos commissions ? Elles constituent le fer de lance de nos engagements d'inclusion, parité et diffusion du savoir. J'ai eu l'occasion, dans Photoniques 118, de saluer et rappeler l'importance de l'action de la commission Réussir la parité en optique. J'évoquerai prochainement la commission Optique/Physique Sans Frontière qui contribue à diffuser les solutions optiques frugales dans divers pays d'Afrique, Asie et Amérique Latine.

Connaissez-vous notre commission Enseignement ? Sous l'égide de son président Christophe Daussy et de sa vice-présidente Estelle Blanquet, elle œuvre à mutualiser des ressources et à échanger sur les pratiques. Certains d'entre vous ont visité les stands d'expériences pédagogiques lors de nos conférences, ou participé aux échanges sur les programmes d'éducation, co-organisés avec les Rencontres Enseignement de l'Optique et Didactique, à OPTIQUE Nice 2022. Je tiens à saluer ici un autre aspect de ses activités. Son action pour favoriser l'émergence de vocations. L'optique est fascinante, mais pour que la fascination opère et se transforme en questionnement, voire en vocation, faut-il encore y être confronté et mieux encore accompagné. C'est l'objectif de notre programme LightBox, labélisé par l'International Day of Light et par l'Année de la Physique. Ce programme est développé par notre commission en partenariat avec l'association AtoutSciences. La LightBox est une « petite boîte » unique, adaptée à des publics très divers, de l'écolier, collégien, lycéen à l'étudiant et à tout curieux. Quelques éléments d'optique et quelques

fiches et ce sont de très nombreuses expérimentations qui deviennent possibles. J'ai moi-même assisté à une animation réalisée par Christophe et constaté les yeux des jeunes brillant de fascination en réussissant à produire un arc-en-ciel. Le programme LightBox reflète pleinement notre philosophie, une péréquation permanente pour atteindre le plus grand nombre. Les LightBox sont prêtées soit gratuitement, soit au coût de fabrication, selon nos possibilités et les moyens du partenaire. Car il s'agit bien d'un partenariat, avec pour seules obligations leur utilisation et la production d'un retour sur les expérimentations. C'est ainsi que 131 LightBox ont déjà donné lieu à 31 projets accompagnés par 13 référents locaux en France, au Sénégal, au Cameroun et au Niger. Bientôt la petite boîte sera déployée dans des musées pour accompagner des visites interactives. L'aventure LightBox ne fait que commencer !

Vous l'aurez compris, à travers ce type d'actions qui s'appuient sur nos commissions, sur des associations, sur des bénévoles et sur notre « structure », la SFO mutualise et fait œuvre utile.

Je souhaite conclure en vous faisant part d'une réflexion-sollicitation. Lorsque nous participons à des projets financés à l'échelle régionale, nationale ou européenne, nous sommes de plus en plus sollicités pour y inclure des actions de vulgarisation, de formation ou d'inclusion. Excellente chose, qui peut cependant être très chronophage, surtout lorsque l'on part de zéro. Pensez à la SFO, aux commissions, envisagez une collaboration, un partenariat, une sous-traitance, cela devrait se traduire par un gain en efficacité et en temps, la SFO fera grandir votre projet et le projet fera grandir notre SFO. Diffusons la lumière ensemble !

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

SFO Thematic School 2023 Waves in complex media from theory to practice

École de Physique des Houches,
du 17 au 29 septembre 2023

Cette école s'inscrit dans le cadre de l'effervescence actuelle liée à la physique des ondes dans les milieux complexes qui couvre non seulement l'optique, les ondes radios, mais également l'acoustique (ondes sonores, ultrasonores, sismiques) et même les ondes de matière. En optique, elle est particulièrement importante pour de nombreuses applications : imagerie biomédicale, photonique, milieux bio-inspirés ou optique atomique pour ne citer que quelques exemples.

L'ambition de WAVES IN COMPLEXE MEDIA est de rassembler les meilleurs spécialistes internationaux du domaine, théoriciens comme expérimentateurs, capables de donner des bases solides sur les fondamentaux du transport des ondes, de l'imagerie, du contrôle des ondes en milieu complexe et de la physique atomique, en insistant sur les analogies entre les différents types d'ondes et de milieux.

Porteurs de projet :

- Sylvain GIGAN
(Laboratoire Kastler-Brossel),
- Nicolas CHERRORET
(Laboratoire Kastler-Brossel),
- Alexandre AUBRY
(Institut Langevin Ondes et Images)

L'inscription est encore ouverte dans cette école, rejoignez nos experts.

Lecturers

Allard Mosk (University of Twente, NL)
John Page (University of Manitoba, CA)
Romain Pierrat (CNRS, FR)
Stefan Rotter (TU Wien, AU)
Anne Sentenac (Institut Fresnel, FR)
Sergey Skipetrov (CNRS, FR)
Carlo Beenaker (Leiden University, NL),
Emmanuel Bossy (Université de Grenoble, FR)
Antoine Browaeys (Institut d'Optique, FR)
Mathias Fink (Institut Langevin, FR)
Arthur Goetschy (ESPCI, FR)
Robin Kaiser (Université Côte d'Azur, FR)

Les Thematic Schools de la SFO

En cette année 2023, la Société Française d'Optique réaffirme sa présence et son engagement, envers la diffusion de la connaissance de l'optique et de la photonique, notamment à travers l'organisation de trois écoles thématiques de haut niveau, dont la variété illustre celle de notre communauté.

Ces écoles thématiques jouent un double rôle en tant que lieux de formation pour les jeunes et espaces d'échanges entre spécialistes de renommée mondiale. Comme l'illustrent les trois exemples de cette année, elles adoptent une variété de formats afin de s'ajuster aux spécificités de chaque thématique et aux objectifs visés. Le staff de la SFO est là pour soutenir et guider les organisateurs et les participants, afin de rendre cette expérience à la fois productive et agréable. Forts de notre expérience accumulée, nous sommes en mesure d'optimiser et de simplifier le parcours, afin que le succès scientifique soit au rendez-vous dans une ambiance conviviale, libérée autant que possible des contraintes administratives. Notre objectif est de vous offrir une expérience sans soucis, où vous pourrez vous concentrer pleinement sur l'échange scientifique.

N'hésitez pas à nous contacter dès maintenant si vous avez des idées de projets pour 2024 et 2025. Nous sommes prêts à vous accompagner et à transformer vos embryons de projets en réalité.

SFO THEMATIC SCHOOL 2023 OPTOMÉCANIQUE & NANOPHONIQUE

Une école pleinement internationale !

École de Physique des Houches, du 17 au 28 Avril 2023



L'école organisée par Rémy BRAIVE et Daniel LANZILLOTTI-KIMURA du C2N / CNRS/ Université de Paris-Saclay/ Université de Paris Cité sur l'interaction photon-phonon a réuni 74 participants venant d'horizons très divers et de très nombreux pays, France, Suisse, Allemagne, Danemark, Pays-Bas, Espagne, Norvège, République Tchèque, Autriche, Finlande, Grande-Bretagne, États-Unis, Canada, Argentine, Brésil, Japon et la Chine.

SFO THEMATIC SCHOOL 2023 LIDARS À L'OHP

LIDARS : des fondamentaux aux applications géophysiques et industrielles. Une école interactive et en immersion !

OHP, Observatoire de Haute Provence, France du 11 au 16 juin 2023

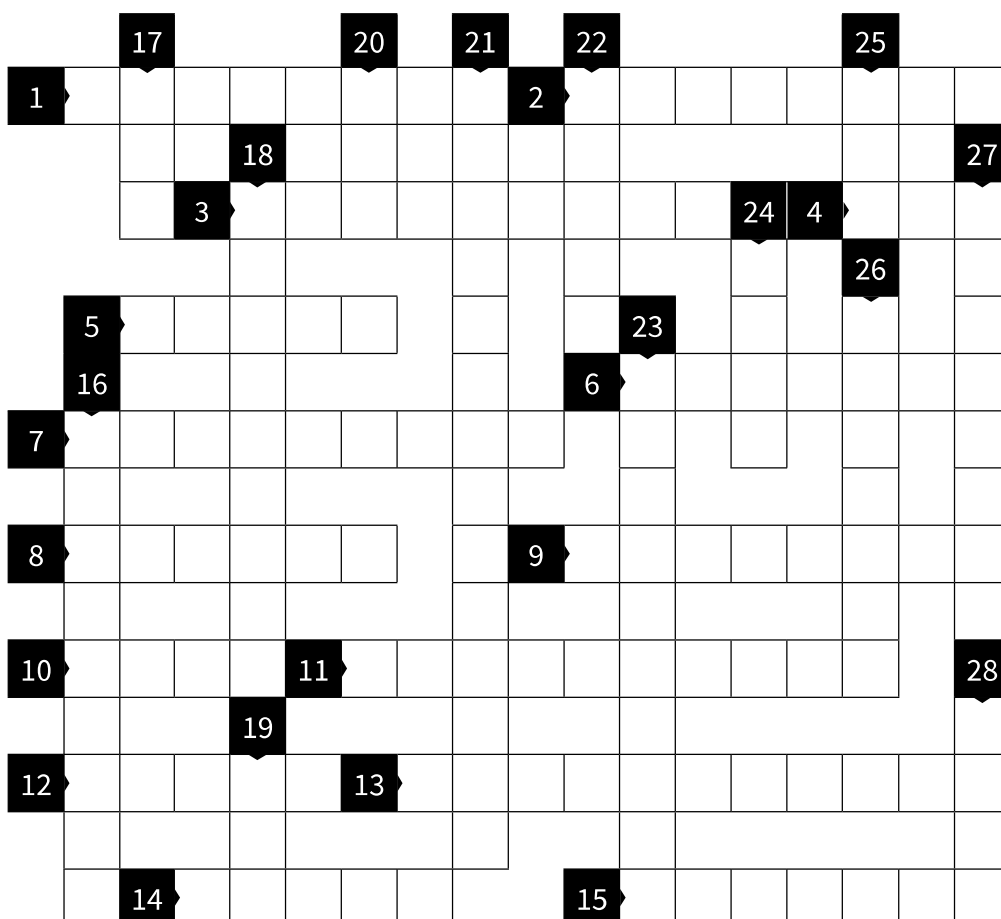


Cette école a été dédiée aux étudiants en Master, doctorants, jeunes chercheurs et ingénieurs souhaitant acquérir un savoir-faire théorique et technique sur les systèmes Lidar auprès d'experts de la communauté Lidar. L'école organisée par Nicolas CEZARD (ONERA) et Sandrine GALTIER (ILM) au nom du Club LIDAR de la SFO, s'est déroulée à l'Observatoire de Haute Provence (OHP), l'un des plus grands observatoires mondiaux pour les sciences de l'atmosphère. Les participants avaient l'occasion de visiter les installations Lidar de l'OHP et d'effectuer des travaux pratiques pour étudier les instruments LIDAR « boîte ouverte ».

MOTS CROISÉS

SUR LE THÈME DE L'IMAGERIE HYPERSPECTRALE

Par Philippe ADAM



SOLUTION SUR
PHOTONIQUES.COM



- 1 Fument... avec brio !
- 2 Inventeur d'une méthode de photographie interférentielle, Prix Nobel de physique de 1908
- 3 Tel un prisme par exemple
- 4 Méthode de régression partielle par les moindres carrés
- 5 Capteur VIS/NIR embarqué australien, utilisé au milieu des années 1990
- 6 Indicateurs phytoplanctoniques télémétrables
- 7 Situation critique pour les sols, les eaux et l'atmosphère
- 8 Réparti dans plusieurs bandes dans un imageur hyperspectral
- 9 Données de base acquises par un système hyperspectral
- 10 Générés en très grandes quantités pour une image hyperspectrale
- 11 Suite d'instructions informatiques pour traiter des données acquises
- 12 Organisme de recherche français actif dans le domaine de l'imagerie hyperspectrale
- 13 Aberrations atmosphériques brouillant les données acquises
- 14 Technique CCD à multiplication d'électrons
- 15 SYstème Spectro-Imageur de mesure des Propriétés Hyperspectrales Embarqué pour applications Défense et développé par l'ONERA
- 16 Balayage transverse d'une image pendant le déplacement du porteur
- 17 Airborne Imaging Spectrometer
- 18 Technique d'extraction des spectres des matériaux purs et de leur abondance
- 19 Si on n'y prend pas garde, se sature par le flot de données
- 20 Hyperspectral Imaging System
- 21 Nom générique pour les caméras effectuant des mesures dans de nombreux canaux spectraux
- 22 Une des départements de l'Observatoire de Paris
- 23 Qualifie les observations par imagerie hyperspectrale pour les espèces marines
- 24 Organisme utilisateur d'imagerie hyperspectrale pour la détection des fuites de CO₂
- 25 Analyse en Composantes Principales
- 26 Etat de surface mesurable à distance par imagerie hyperspectrale
- 27 Nouvelle famille de missions d'observation de la Terre de l'ESA
- 28 Institut français engagé dans la surveillance des contaminations végétales



Entretien avec Pascale Senellart

Photoniques s'entretient avec Pascale Senellart, directrice de recherche au CNRS, médaille d'argent CNRS, élue en 2022 à l'Académie des Sciences et co-fondatrice de l'entreprise Quandela.

COMMENT EST NÉE VOTRE VOCATION POUR LA PHYSIQUE ?

Entre le domicile de mes parents et celui de mes grands-parents se trouvait la station de radioastronomie de Nançay. Cette station me faisait rêver lorsque nous passions devant et j'ai souhaité y réaliser mon stage de 3°. C'est ainsi que j'ai passé une semaine immergée dans ce laboratoire où j'ai été accueillie d'une manière incroyable. J'étais très curieuse, je posais beaucoup de questions et j'ai pu visiter tous les coins de la station. Devant mon enthousiasme, l'équipe m'a alors proposé de revenir quand je le souhaitais. Et j'y suis retournée une vacance sur 2 les 5 années qui ont suivi ! L'environnement me plaisait et j'ai ainsi tout de suite su que je voulais travailler dans le monde de la recherche. En 1^{ère}, mes parents étaient dans une situation financière difficile et mon professeur de mathématiques m'a incitée à présenter un dossier pour « La bourse de la vocation scientifique féminine » de la région Centre (10000 francs par an pendant 4 ans). J'ai été la lauréate de cette bourse ce qui m'a permis de poursuivre mes études à Paris et d'intégrer la prépa Louis Le Grand.

VOUS AVEZ ENSUITE DÉCOUVERT LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

J'ai eu le déclic pour la mécanique quantique lors d'un oral du concours d'entrée à l'ENS Lyon où mes 2 examinateurs m'ont demandé de réfléchir à l'expérience des fentes d'Young et de faire le lien avec les inégalités d'Heisenberg. Cet échange fut riche et a nourri mon intérêt pour la mécanique quantique. Si j'ai finalement préféré intégrer

l'école Polytechnique, cet oral aura lancé ma vocation pour la mécanique quantique. Je n'ai jamais regretté le choix de l'X (à part le service militaire !) ; j'ai eu la chance d'avoir des professeurs très enthousiasmants qui nous ont fait découvrir la mécanique quantique, Jean-Louis Basdevant, Alain Aspect ou encore Claude Weibusch avec son cours sur les semi-conducteurs. Ce cours m'a d'ailleurs convaincue de m'orienter vers une thèse sur les semi-conducteurs, et plus précisément sur les polaritons. Il s'agissait d'une thèse très fondamentale dont l'objectif était de prouver que les excitons ont les propriétés des bosons. Je travaillais notamment avec Jacqueline Bloch qui est aujourd'hui internationalement reconnue pour ses travaux dans ce domaine. Cette période était très intense, le sujet connaissait de vifs débats scientifiques. J'ai eu en parallèle mon premier enfant durant la thèse et était enceinte de mon deuxième enfant à la fin de ma thèse. Je me sentais fatiguée et je souhaitais changer de sujet. Ces circonstances ont fait que j'ai finalement opté pour un post-doc de 9 mois en entreprise, chez Schlumberger, pour travailler sur la détection de gaz par spectroscopie infrarouge. J'ai beaucoup apprécié le travail dans une équipe « projet » où chacun apporte une expertise bien spécifique. Mais souhaitant tout de même à terme intégrer le CNRS, et ayant échoué lors de ma première audition au concours CNRS, il me fallait revenir vers un parcours académique. C'est pourquoi j'ai fait un ATER au MPQ, dans le groupe de Vincent Berger. J'ai découvert l'activité d'enseignement mais je trouvais difficile de lancer une ligne de recherche en même temps... J'ai alors pensé rejoindre le monde de l'entreprise mais

j'ai tenté le concours CNRS une seconde fois avec le LPN (aujourd'hui C2N), et j'ai été prise.

VOUS AVEZ ALORS PU VOUS CONCENTRER SUR VOTRE PROJET DE RECHERCHE

Oui, j'ai dédié mon temps à la réalisation de mon projet de recherche que j'avais imaginé et écrit pour intégrer le CNRS. Ce projet portait sur l'intégration de boîtes quantiques dans des cavités optiques. J'ai retrouvé Jacqueline Bloch. Nous avions toutes les deux des enfants en bas âge. Nous nous sommes épaulées et notre soutien mutuel nous a beaucoup apporté.

COMMENT AVEZ-VOUS IMAGINÉ CETTE APPROCHE SI NOUVELLE POUR INSÉRER DES BOÎTES QUANTIQUES EN CAVITÉ ?

Pour mettre en cavité des boîtes quantiques, je dirais que nous jouions aux dés comme tout le monde. Par cette méthode empirique, nous avons produit un échantillon qui marchait bien et avec lequel nous avons obtenu le premier couplage fort. Ces résultats ont été publiés en 2005 dans la revue Phys. Rev. Lett. Mais manque de chance, nous avons cassé l'échantillon qui nous avait permis d'obtenir ces résultats et malgré tous nos efforts, nous ne parvenions pas à le reproduire. J'étais alors convaincue que nous ne pouvions pas poursuivre ainsi. L'idée qui a changé la suite de l'histoire m'est venue en septembre 2005 à la conférence OECS. J'ai eu l'occasion de visiter une équipe de recherche à l'université de Southampton qui possédait une technique de lithographie directe par laser. Je connaissais la lithographie par projection par masque mais

cette équipe travaillait avec des lasers UV focalisés dans l'échantillon. Je me suis dit que c'est ce que je devais faire mais à température cryogénique (4°K). Mais devant l'ampleur de la tâche qui m'attendait pour y parvenir, j'en ai discuté avec Paul Voisin, notre animateur d'équipe et sa réaction a été très positive: il m'a pleinement soutenue en me disant que si je ne prenais pas le temps maintenant d'explorer ce type d'idées « farfelues », je ne le prendrais jamais. Je réalise aujourd'hui la chance que j'ai eue de pouvoir travailler dans de telles conditions. Je me suis concentrée 18 mois pour développer cette approche et casser ce verrou afin d'aller plus loin dans le contrôle de l'interaction entre la lumière et la matière.

ET QUEL ÉTAIT LE PRINCIPE DE CETTE NOUVELLE APPROCHE ?

Le principe consiste à repérer optiquement la position d'une boîte quantique au sein d'un empilement planaire. La structure initiale consiste en une couche contenant les boîtes quantiques disposées aléatoirement, avec des empilements diélectriques réfléchissants en haut et en bas de cette couche d'émetteurs. Je dépose sur l'empilement une résine photosensible et je refroidis le tout à 4°K. Puis j'excite avec un laser et je fais de la spectroscopie pour recueillir l'émission des boîtes. Le spot laser présente une taille caractéristique d'un micron alors que les boîtes quantiques ne font que 30 nm. Mais comme l'objet au bord du faisceau laser reçoit une intensité plus faible que lorsqu'il est au centre, je peux mesurer la position de l'émetteur avec une résolution nanométrique. Je peux mesurer très précisément la position de mon émetteur. Lorsqu'il est au centre du premier laser, j'allume un second laser superposé au premier pour insoler la résine et définir la cavité optique centrée sur l'émetteur. Cette approche me permettait de dessiner la cavité optique par photolithographie centrée sur la boîte quantique avec une seule étape de lithographie. Ce travail nous a permis de démontrer la fabrication déterministe d'un émetteur quantique en cavité.

QUELLES ONT ÉTÉ LES GRANDES ÉTAPES DE VOS RECHERCHES ?

Je souhaitais en fait obtenir des émetteurs à base de semi-conducteurs aussi propres que des atomes uniques en contrôlant la dynamique d'émission et le diagramme de rayonnement. Nous avons publié les résultats issus de cette nouvelle technique de lithographie optique en 2008. C'est le papier que j'ai eu le plus de mal à publier, mais un de ceux qui auront le plus d'impact sur la suite de nos activités. A partir de là, tout a changé car nous parvenions à réduire la sensibilité de l'émetteur à son environnement.

Nous avons commencé à susciter l'intérêt de la communauté de l'optique quantique.

En 2010, nous avons publié une première en montrant une source de photons intriqués très brillante. Cet article a été publié très facilement dans la revue Nature. En 2013, nous avons publié des résultats sur une source de photons uniques qui détient toujours le record de brillance. C'est à cette époque que j'ai commencé à être invitée à des conférences d'optique quantique. J'ai mieux compris ce dont les chercheurs qui développent les technologies quantiques ont besoin. Il leur fallait des sources de photons uniques très brillantes, oui, mais aussi très indiscernables. J'ai alors eu la chance d'être soutenue et motivée par un grand nom du domaine, Pr Andrew White de l'université du Queensland en Australie, qui est un des fondateurs du calcul quantique optique. Il est venu me rendre visite et m'a expliqué pourquoi notre approche était si importante pour le domaine, et nous a tracé la voie pour la suite. Les années 2013-2016 ont été consacrées à l'amélioration du contrôle sur nos composants, notamment en ajoutant un contrôle électrique pour réduire le bruit de charge. En 2016, nous avons produit des photons indiscernables. Ce nouveau résultat a marqué un nouveau tournant très important car ce résultat démontre la compatibilité de notre approche avec les technologies quantiques.

COMMENT ET POURQUOI AVEZ-VOUS CRÉÉ L'ENTREPRISE QUANDELA ?

Nous avons observé un engouement très fort autour de nos sources de photons uniques indiscernables et c'est là que Niccolo Somaschi, post-doctorant de l'équipe a proposé de créer une entreprise pour commercialiser nos sources. J'ai contacté Khaled Karrai que je connaissais bien et qui avait créé Attocube, pour avoir son avis sur ce projet. Khaled nous a fortement encouragés et nous a donné des conseils très précieux. Valérian Giesz, doctorant de l'équipe, possédait lui en plus de son pedigree scientifique une expérience dans le management de par son expérience associative, menée en parallèle à sa thèse. Nous nous sommes réunis tous les 3 et avons décidé de lancer une start-up basée sur notre technologie. Nous sommes alors fin 2015. Nous avons pris une année et demi pour nous former à l'entrepreneuriat, monter des dossiers de financements (programme de pré-maturation du CNRS, de valorisation de l'université Paris Saclay) et tester la reproductibilité de notre technologie. Il faut réaliser qu'à l'époque très peu d'entreprises étaient créées autour des technologies quantiques, notre projet apparaissait très étrange à beaucoup d'acteurs de la valorisation en France. Nous avons créé Quandela en 2017 et vendu nos premières sources juste après.

CETTE PÉRIODE CORRESPOND À L'ÉMERGENCE DES GRANDS PROGRAMMES AUTOUR DU QUANTIQUE

Nous avons commencé comme une boîte de fournisseurs de composants de sources de photons uniques. Il s'agissait d'un petit marché disruptif mais le quantique a alors changé de dynamique avec le lancement des programmes européens, américains et chinois. En 2020, nous avons décidé de nous lancer dans la construction d'un ordinateur quantique basé sur nos photons uniques. Nous avons alors recruté Shane Mansfield, spécialiste d'algorithmique quantique. Il a su agréger une équipe autour de lui. La première levée de fonds a été réalisée en 2021 pour un montant de 10 millions d'€. L'entreprise a alors connu

une très forte croissance : d'une quinzaine d'employés en 2021, nous sommes passés à 70 employés début 2023. Nous avons maintenant toutes les compétences, du composant semi-conducteur, aux modules optiques au software et à l'algorithmique quantique. C'est une formidable équipe qui s'est lancée le défi de mettre un premier ordinateur quantique sur le cloud et l'a réussi fin 2022 avec 6 qubits. La collaboration avec le CNRS prend aussi de l'ampleur car l'avenir de la technologie dépend très fortement de la recherche fondamentale dans mon équipe. C'est pourquoi nous sommes en train de finaliser un laboratoire commun CNRS/Quandela. Il y a une boucle de rétroaction très positive entre mon équipe de recherche académique et Quandela, car nous bénéficions dans mon équipe de tous les progrès technologiques réalisés chez Quandela. Il y a maintenant 13 personnes qui travaillent à temps plein sur la fabrication des composants et nous pouvons mener au CNRS des expériences que très peu de groupes peuvent réaliser grâce à la qualité de ces sources quantiques.

VOUS AVEZ ÉTÉ TRÈS IMPLIQUÉE DANS LE DÉPLOIEMENT DU PLAN QUANTIQUE

Mes activités de recherche se sont toujours situées à l'interface entre plusieurs domaines scientifiques de la physique. Je fais de la physique atomique avec de la matière condensée, je développe de la technologie pour de la physique fondamentale... Même si cet aspect a parfois été un frein au cours de ma carrière, c'est aussi un atout. Le président de l'université Paris Saclay m'a demandé en 2018 de piloter un groupe de travail réfléchissant à la pertinence de créer une structure quantique à Saclay. L'Europe lançait son plan quantique mais il ne se passait rien au niveau national. Nous avions à Saclay beaucoup de groupes travaillant dans ces domaines, mais chacun dans son silo. Je sentais qu'il y avait quelque chose à faire pour mettre en synergie toutes ces communautés et surmonter quelques passifs. J'ai reçu plusieurs lettres de mission afin de développer ce projet. La présidente de l'université Paris-Saclay, Sylvie Retailleau, a

reconduit ma mission. On a ainsi pu inaugurer le centre quantique fin 2019 qui fut l'un des premiers projets transversaux de la nouvelle université. Il m'a ensuite été demandé d'intégrer la task-force du gouvernement pour représenter les universités dans la définition de la feuille de route du plan quantique.

Nous avons travaillé avec une dizaine de personnes sur la définition du plan quantique, identifier nos forces et nos faiblesses, mais aussi définir les grands projets à soutenir et discuter des budgets. Dans le cadre de Quantum Saclay, je me suis également impliquée dans une réflexion sur la restructuration des programmes d'enseignement. J'enseignais depuis 2014 à l'école Polytechnique mais je n'avais jamais participé à la création de nouvelles filières et le défi d'adapter les filières de formations aux nouveaux enjeux du quantique est passionnant. Sur Saclay, nous avons mené plusieurs actions : création du master 2 Quantum Light Materiel and Nanosciences (QLMN) qui nous a permis de doubler le nombre d'étudiants en restructurant 2 anciens master 2.

Avec Jean-Francois Roch, il nous est apparu important de créer une formation interdisciplinaire entre l'informatique et la physique. Il s'agit d'une année supplémentaire entre le M1 et le M2 qui s'appelle ARTEQ et que nous avons créée pendant le confinement en 2020. Cette formation connaît un succès fou et nous devons aujourd'hui plafonner les inscriptions. On prend les étudiants au niveau M1 en sciences pour leur donner le minimum nécessaire en mécanique quantique et informatique et leur faire connaître le monde des technos quantiques avec 6 mois de cours et 6 mois de stage. Avec Marino Marsi et Sophie Kazamias, nous avons pensé qu'il fallait aussi accroître l'attractivité des filières quantiques au niveau international. Nous avons construit et décroché un Erasmus Mundus appelé Quarmen, avec l'université La Sapienza de Rome, les universités de Porto et de Toronto et nous accueillons cette année la première promotion d'étudiants venant du monde entier passionnés par les technologies quantiques.

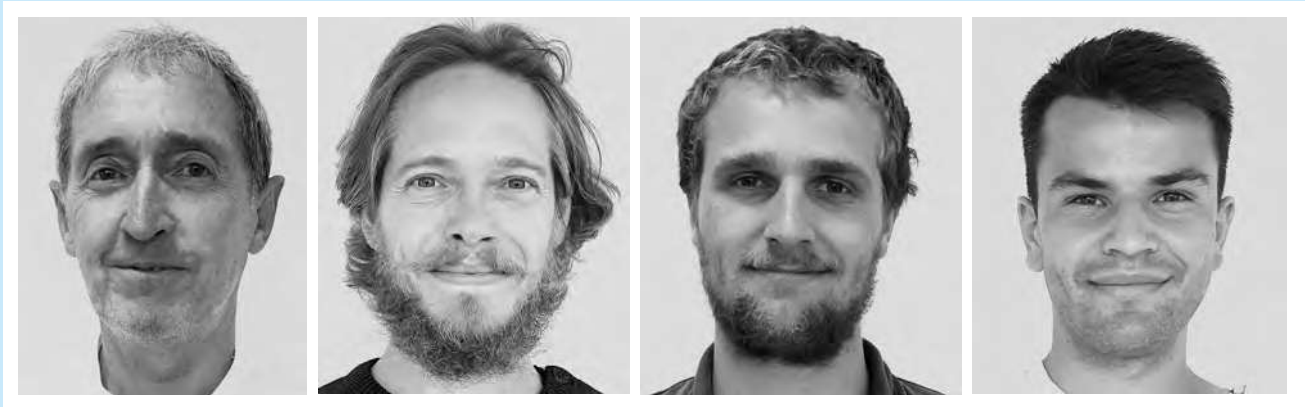
COMMENT VOYEZ-VOUS L'AVENIR DES TECHNOLOGIES QUANTIQUES ?

L'aventure de l'ordinateur quantique est définitivement lancée. En regardant le passé, nous sommes passés des transistors et des ordinateurs qui remplissaient des salles entières aux composants actuels. Beaucoup de personnes pensaient que les transistors, les lasers resteraient des objets de laboratoire. Nous sommes aujourd'hui avec les technologies quantiques dans une situation similaire. Le privé s'est emparé de ces technologies et les progrès s'accroissent. Je suis convaincue que de plus en plus d'applications vont en découler mais probablement pas celles que nous anticipons aujourd'hui, il est difficile de prévoir ce qui va sortir de ces technologies. Mais les résultats scientifiques sont impressionnants, et je reste certaine que de nombreuses applications vont émerger. A titre personnel, l'aventure Quandela est vraiment passionnante et il est difficile pour moi d'imaginer à quoi elle ressemblera dans quelques années quand je vois la vitesse avec laquelle les choses ont progressé ces derniers mois. C'est une aventure qui me permet de constamment apprendre – c'est une grande chance. Avec tous les progrès technologiques, côté recherche fondamentale, on découvre que l'on peut créer des états très exotiques de la lumière, intriquer par exemple les photons dans la base des nombres. Les possibilités sont grandes et je souhaite aussi réfléchir aux nombreuses possibilités d'applications par exemple pour le sensing. Nous travaillons également en collaboration avec Alexia Auffèves sur l'étude des processus énergétiques au niveau quantique. Le sujet est très compliqué, mais réfléchir avec le prisme de l'énergie nous permet de comprendre différemment comment fonctionne les systèmes quantiques. Tout cela est très intense – et je m'imaginais parfois dans quelques années ralentir un peu – et prendre plus de temps pour enseigner – Pourquoi pas créer une nouvelle filière quantique dans une université de province qui ne serait pas encore lancée dans cette nouvelle aventure ? ●

TÉMOIGNAGE D'ENTREPRENEUR

Mathieu Ribes, POP® Photonics Open Projects

Photoniques s'entretient avec Mathieu Ribes, Président et co-fondateur de POP® Photonics Open Projects



VOUS AVEZ TOUJOURS CHERCHÉ À VOUS INVESTIR DANS LA PHOTONIQUE POUR LE VIVANT

Oui, à la suite de mes études en classe préparatoire en région bordelaise, j'ai intégré l'ENSSAT qui mettait en avant cette discipline. Afin de renforcer encore plus mes compétences dans ce domaine, j'ai réalisé mon premier semestre de 3^e année à l'Abbe School of Photonics de Jena afin de développer davantage mes compétences en biophotonique et en imagerie optique.

A mon retour en Bretagne, j'ai effectué mon stage de fin d'étude à Photonics Bretagne, à Lannion, sur le thème de l'imagerie hyperspectrale à bas coût pour l'agriculture de précision.

C'EST LÀ QUE LE PROJET POP EST NÉ

Ce stage étant un premier succès technique, un projet a été mis en place au sein du partenariat Agrophotonique entre Photonics Bretagne et ARVALIS - Institut du Végétal. Un article a été publié pour diffuser ces premiers développements [1] et un projet de ressourcement a permis entre autres de continuer les développements sur cette technologie permettant de passer d'un prototype low-cost de laboratoire à un démonstrateur en extérieur mesurant

au sein de la plateforme de phénotypage Phénofield [2].

Enfin un projet de maturation d'un an de la techno financé par la région a permis de développer deux capteurs : un kit pédagogique assemblé ou sur pièce pour l'enseignement et le développement ONE-PIX (low-cost et libre) ; une version industrielle PRO-PIX (plus robuste et performante) et de maturer la réflexion sur le transfert de ces technologies innovantes.

COMMENT AVEZ-VOUS FINANCÉ LE DÉVELOPPEMENT DE LA TECHNOLOGIE ?

Les stratégies de développement de l'entreprise se basent sur une croissance raisonnée, de la transparence et du service rendu (à la communauté ou aux porteurs de cas d'usage à haut niveau d'exigence). En termes de ventes, on mise beaucoup au début sur la communauté ONE-PIX d'enseignement français et européen.

Nous avons nativement une implantation internationale (on réfléchit notamment à multi localiser la production de ONE-PIX en Asie pour limiter les coûts carbonés d'expédition injustifiés).

On souhaite aussi rapidement établir des contrats de distribution et de revente auprès des fournisseurs et distributeurs

de spectromètres. Et d'autres part, nous allons instrumenter les sciences agronomiques et environnementales à travers des plans d'équipements dans les réseaux français et internationaux de phénotypage et d'agriculture de précision avec PRO-PIX.

POUVEZ-VOUS NOUS PRÉSENTER L'ÉQUIPE IMPLIQUÉE DANS CE PROJET ?

POP a la chance de compter sur ses quatre co-créateurs. Gaspard Russias qui est ingénieur en photonique diplômé de l'ENSSAT Lannion en 2017. Il travaille depuis 5 ans chez Photonics Bretagne en tant qu'ingénieur R&D sur diverses problématiques visant à étudier les interactions lumières/matières biologiques. Il assure la fonction de responsable technique au sein de POP. Antoine Fournier est ingénieur optronique et Docteur en télédétection des couverts végétaux. Il est spécialiste capteur pour ARVALIS depuis plus de 10 ans et est le responsable scientifique et commercial au sein de POP. Denis Tregogat, PhD ingénieur, responsable Biophotonique & CRT au sein de Photonics Bretagne occupe le rôle de business developer. Enfin Mathieu Ribes sera le premier président de POP.

Notre stratégie d'innovation est hybride de par l'animation de cette communauté autour du kit pédagogique et de recherche ONE-PIX dont l'ensemble des informations sont disponibles en ligne sur la plateforme GitHub.

COMMENT S'EST OPÉRÉ LE CHOIX DE CRÉER UNE ENTREPRISE DÉDIÉE À CETTE TECHNOLOGIE ?

A l'issue de ces développements, nous avons eu la volonté de créer une entreprise à quatre pour porter une stratégie différente et adaptée à notre projet. La technologie a été sélectionnée pour sa sobriété numérique et car l'aspect mono-pixel permet de maîtriser la structure des coûts et de garantir son avènement. Par ailleurs, cela permet de créer l'opportunité que nos premiers ambassadeurs et clients soient au cœur d'une communauté active d'utilisateurs. Que cela, on a besoin de pérennité, de sécurité, de stabilité, d'où un modèle coopératif.

QUELLES SONT LES INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES DE VOS PRODUITS ?

On part de concepts technologiques d'imagerie compressée assez récents qui ont été formalisés il y a une quinzaine d'années. On a démontré qu'elles peuvent fonctionner de manière macroscopique, hyperspectrale et en diminuant certains coûts. Cette technologie est intéressante car elle répond exactement à un besoin métier formulé lors des phases de développements. Antoine sait que l'imagerie hyperspectrale est très intéressante pour les besoins en agriculture de précision. Par sa sobriété numérique et sa modularité, on la rend plus attrayante et concrètement utilisable.

VOUS AVEZ OPTÉ POUR UNE STRATÉGIE HYBRIDE D'INNOVATION

A l'image de ce qui a été réalisé avec Arduino, LINUX, on veut créer une communauté active en photonique. On souhaite animer et appuyer une

communauté active d'utilisateurs et de passionnés. Certaines collaborations ont déjà vu le jour notamment avec l'IRHS d'Angers, Nokia Lannion et l'INSERM de Lyon.

Il existe des interactions fortes entre les deux capteurs qui reposent sur l'intelligence que l'on place dans ces capteurs (IA, traitement de signal, IOT...). Il est ainsi stratégique de mettre à disposition d'une communauté d'utilisateurs un outil plus abordable pour mener à plusieurs des développements rendant l'ensemble des capteurs plus intelligents. Notre stratégie d'innovation est hybride de par l'animation de cette communauté autour du kit pédagogique et de recherche ONE-PIX dont l'ensemble des informations sont disponibles en ligne sur la plateforme GitHub [3]. Les bénéfices de cette stratégie permettent d'implémenter de nouvelles solutions et de proposer des services, par exemple pour caractériser le phénotypage des plantes avec le capteur industriel PRO-PIX.

L'INNOVATION PORTE ÉGALEMENT SUR LE FORMAT D'ENTREPRISE

Nous portons également une innovation entrepreneuriale dans le format de la création d'entreprise. Afin d'attirer et de conserver des talents, nous avons choisi un format d'entreprise collaborative SCOP. Les porteurs de savoir-faire sont au centre du projet. L'entreprise POP est pour eux un outil leur permettant

de développer et de diffuser des technologies capacitanes et plus sobres dans les meilleures conditions. Les salariés ont tous une voix décisionnelle. POP reste donc ouvert à tous ceux qui souhaiteraient s'intégrer à cette aventure collaborative pour des technologies d'innovations ouvertes et réelles.

QUELS SONT LES MARCHÉS VISÉS ?

L'imagerie hyperspectrale trouve des intérêts dans beaucoup de domaines. Pour commencer, nous viserons les marchés de l'agriculture de précision, de la géologie, et du paramédical.

QUELLES SONT LES STRATÉGIES DE DÉVELOPPEMENT DE L'ENTREPRISE ?

Les stratégies de développement de l'entreprise se basent sur une croissance raisonnée, de la transparence et du service rendu (à la communauté ou aux porteurs de cas d'usage à haut niveau d'exigence). On souhaite rapidement établir des contrats de distribution et de revente auprès des fournisseurs et distributeurs de spectromètres. Nous avons nativement une implantation internationale (on réfléchit notamment à multi localiser la production de ONE-PIX en Asie pour limiter les coûts carbonés d'expédition injustifiés).

En termes de ventes, on mise beaucoup au début sur la communauté d'enseignement français et européen. On partira à moyen terme sur l'International. Et d'autres part, on attaque fort tout de suite à instrumenter les sciences agronomiques et environnementales à travers des plans d'équipements dans les réseaux français et internationaux de phénotypage et d'agriculture de précision. ●

RÉFÉRENCES

[1] M. Ribes, G. Russias, D. Tregoat, A. Fournier, "Towards Low-Cost Hyperspectral Single-Pixel Imaging for Plant Phenotyping," *Sensors* **20**, 1132 (2020) <https://doi.org/10.3390/s20041132>

[2] <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/phenofield-varietes-tolerantes-secheresse>

[3] <https://github.com/PhotonicsOpenProjects/ONE-PIX>

Clubs et Commissions, les forces vives de la SFO

Benoît BOULANGER^{1,2}, Juan Ariel LEVENSON²

¹ Université Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, Institut Néel, Grenoble, France

² Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, CNRS/Université Paris-Saclay, 91120 Palaiseau, France

*benoit.boulanger@neel.cnrs.fr



Fêter le quarantième anniversaire de la SFO ne peut se concevoir sans célébrer ses Clubs et Commissions qui sont les forces vives de notre société savante. Cet article présente une description synthétique des Clubs aux profils variés, tout en montrant leurs complémentarités. Il introduit aussi nos Commissions, véritables fer de lances des valeurs d'inclusion, de diffusion des savoirs et de mutualisation qui fondent notre SFO.

<https://doi.org/10.1051/photon/202312023>

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

La SFO compte aujourd'hui 16 Clubs listés ci-après dans l'ordre tel que présenté sur notre site web [1] : JNOG (Optique guidée), COLOQ (Lasers et Optique Quantique), LIDAR, PIO (Physique & Imagerie optique), JNCO (Cristaux pour l'optique), Nanophotonique, CDOP (Diagnostic Optique & Photonique), PSV (Photonique et Sciences du vivant), HORIZONS de l'Optique, JRIOA (Optique adaptative), CFOR (Fibres Optiques et Réseaux), JNPO (Photonique Organique), LIBS, OMW (Optique & micro-ondes), Calcul Optique, et Couches minces. Et puis il y a 3 entités qui ne procèdent pas d'une thématique scientifique et qui sont appelées « commissions », à savoir : Enseignement, Réussir la Parité en Optique et OSF (Optique Sans Frontière).

Les clubs et commissions organisent leurs propres événements mais se retrouvent aussi tous ensemble lors de OPTIQUE qui est le congrès biennal de la SFO.

Les Clubs

Chacun des Clubs regroupe une communauté thématique de l'optique et de la photonique qui se reconnaît sous une même bannière. Les frontières ne sont pas étanches, mais il y a un centre de gravité bien identifiable. Tous nos clubs ont néanmoins la vocation commune d'opérer un rapprochement entre monde académique et milieux industriels, ce qui constitue l'ADN de la SFO. En effet,

chaque Club est un lieu d'échange des connaissances scientifiques et techniques entre les acteurs du domaine considéré et d'orientation des futurs développements applicatifs. Il est intéressant de présenter nos Clubs comme regroupés en trois grands ensembles, à savoir « concepts », « matériaux » et « applications », qui peuvent être vus comme les trois lignes de force de la SFO. La figure 1 illustre cette architecture en montrant aussi qu'il y a bien évidemment des synergies entre ces trois blocs.

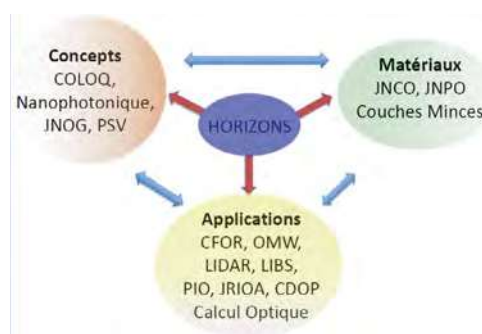


Figure 1 : Complémentarité thématique et synergie des Clubs de la SFO. HORIZONS est le Club pionnier.

HORIZONS joue un rôle singulier et majeur dans cet ensemble car c'est le Club pionnier de la SFO. HORIZONS a été le congrès biennal de la SFO jusqu'à 2007, date de la création. Complémentaire des autres Clubs, HORIZONS met en avant des domaines variés, comme l'imagerie, les capteurs, le spatial ou la nano- et micro-optique par exemple, tout en favorisant l'émergence de ●●●

thèmes qui pourront faire l'objet de nouveaux Clubs. Il joue ainsi un rôle de veille qui favorise les synergies entre Clubs.

Les autres Clubs, regroupés selon les trois blocs évoqués précédemment,

sont décrits ci-après à partir des informations émanant de notre site web. Dans chaque bloc, l'ordonnancement des Clubs est celui de la chronologie de leur création.

COMMISSIONS

La palette thématique couverte par les Clubs est complétée par trois Commissions transverses tournées vers le partage et l'inclusion, qu'il s'agisse de la connaissance, du genre et de la géographie.

La Commission Enseignement a pour mission de susciter, accompagner et valoriser tout type d'action visant à promouvoir l'enseignement de l'optique. Elle a ainsi pour but de former une communauté qui soit un lieu privilégié d'échanges et d'actions concertées entre tous les acteurs de l'enseignement en optique : enseignants, chercheurs et industriels. La Commission Enseignement intervient également dans la diffusion de la culture scientifique sur le thème de la Lumière, en favorisant la mise en place d'actions concertées avec des associations ou des établissements d'enseignement secondaire. Elle a notamment développé, en collaboration avec l'association Atout Sciences, le Kit LightBox, qui est en cours d'une large diffusion [2]. Afin de faciliter les liens entre les différents intervenants du domaine, la Commission Enseignement propose régulièrement des échanges sous forme de « rencontres pédagogiques » animées au cours du congrès OPTIQUE Ville mais aussi des journées thématiques des clubs. Elle propose également la mise en place d'outils permettant de mutualiser diverses ressources, comme la base de données pédagogiques HAL SFO ouverte à tous [3].

La Commission Réussir la parité en optique, associée à la Commission Femmes et Physique de la SFP, a pour but de promouvoir les femmes en optique, de les aider dans la gestion de leur carrière et de créer un réseau d'opticiennes françaises. Ses actions sont variées et tendent à améliorer leur visibilité et à améliorer la place des femmes en optique. Parce qu'il est indéniable que les femmes représentent un potentiel de talents équivalent à celui des hommes, il est important que les institutions du secteur académique, comme les entreprises du secteur privé, puissent attirer, promouvoir et retenir celles-ci. Ceci est d'autant plus vrai dans la filière technologique, où la proportion de femmes est traditionnellement moins élevée que dans d'autres filières, notamment au niveau des fonctions d'expert.

La Commission Optique sans frontières est construite sur le modèle de la Commission Physique sans Frontières de la SFP, dont elle est complémentaire et avec laquelle elle mène des actions de promotion de la photonique en dehors des frontières de la France. Cette Commission s'inscrit dans une démarche de solidarité scientifique internationale et a pour ambition de faciliter le déploiement de l'optique dans les pays où les conditions économiques et sociales ne sont pas favorables au développement des sciences, action menée en coopération avec les collègues de ces pays. La démarche se veut collective et collaborative. [4]

Concepts

Les JNOG rassemblent la communauté de l'optique guidée et célèbre, comme la SFO, son quarantième anniversaire. Ce Club a accompagné l'essor des télécommunications optiques, de l'optique intégrée, des lasers fibrés ou intégrés. Il s'est ouvert aux capteurs et à l'instrumentation optique guidée en général, ou encore plus récemment aux apports de l'Intelligence artificielle pour l'optique guidée. Ses principales thématiques sont les suivantes : propagation guidée, propagation multimode et phénomènes modaux, capteurs, instrumentation et techniques de caractérisation, amplificateurs et lasers à fibre ou à semi-conducteurs, effets non linéaires en optique guidée, nouveaux matériaux, dispositifs et systèmes, micro- et nano-photonique pour l'optique guidée, composants associés à l'optique guidée. Récemment rejoint par le Club CFOR, JNOG a étoffé ses efforts pour favoriser les échanges informels entre grands donneurs d'ordres, industriels, exploitants de réseaux et fournisseurs de services, acteurs économiques et académiques impliqués dans la thématique des fibres optiques et réseaux qui est à large spectre d'utilisations. De ce fait, il constitue également un des Clubs SFO qui auraient pu être décrits dans le bloc applicatif.

COLOQ est le Club de l'optique non linéaire, de l'optique quantique, de l'optique atomique et des sources de lumières extrêmes. Ce Club historique, marquant le rapprochement des communautés de l'optique non linéaire et quantique avec celle de la physique atomique, a évolué avec ces interfaces et couvre des domaines tels que le développement de sources laser extrêmes, le refroidissement et la manipulation d'atomes et molécules par laser, l'exaltation des réponses optiques non linéaires, ou encore l'exploitation de nouvelles sources de photons pour des protocoles quantiques de traitement et communication de l'information,



Premier atelier « Physique sans frontières » sous l'égide de la SFP et de la SFO en Afrique à Ouagadougou en juillet 2021. Il était question d'énergie solaire.

ces nouvelles sources tirant souvent profit d'avancées réalisées dans les nanosciences. Pour toutes ces applications, le contrôle de la propagation et du confinement de la lumière est un enjeu de taille, que ce soit en espace libre ou diffusant, au sein de guides

d'ondes, de micro- ou nano-cavités. La dynamique non linéaire, qu'elle soit au cœur des lasers ou source de phénomènes extrêmes dans les fibres optiques, représente également un sujet qui nourrit la communauté COLOQ sur beaucoup d'aspects.

Le Club Photonique et Sciences du Vivant s'intéresse aux développements optiques et photoniques pour la biologie et la médecine. Ce domaine interdisciplinaire, qui a vu un développement spectaculaire au cours des deux dernières décennies, sollicite l'interaction entre spécialistes de domaines très différents comme l'optique physique, l'instrumentation, l'optique de milieux complexes, la microscopie. Dans tous ces domaines, l'optique a un apport fondamental pour la détection, le diagnostic, ou le traitement, à des échelles variées : nanométriques (microscopies super résolues), microscopiques (techniques de contraste et d'imagerie microscopiques, etc.), ou macroscopiques (imagerie optique des milieux diffusants ou techniques multi-ondes). Les domaines abordés vont de la biologie fondamentale au diagnostic médical, des études *in vitro* ou *in vivo* sur animal aux études cliniques sur l'homme et de ce fait concerne également le bloc applicatif.

Le Club Nanophotonique regroupe la communauté s'intéressant aux interactions de la lumière avec la ●●●



Photo de famille lors de la première édition de COLOQ en 1989. © Photo S. Kovalsky.

matière à une échelle sub-longueur d'onde. La structuration sub-longueur d'onde, permise par les progrès de la modélisation et de la nano-fabrication, peut ainsi donner naissance aux effets plasmoniques ainsi qu'aux comportements de type métamatériaux/métasurfaces. Ces objets peuvent être source d'innovation pour les composants optiques et optoélectroniques, mais sont aussi le siège d'effets exaltés, qu'ils soient non linéaires, quantiques, thermiques, etc.

Matériaux

JNCO est le lieu d'échange sur l'élaboration, la caractérisation et la mise en œuvre de cristaux pour l'optique. Tous types de cristaux sont considérés, massifs, en couches minces ou sous forme de fibres de gros diamètre, micro-voire nano-structurées, mais également de poly-cristaux et de céramiques transparentes entrant dans la réalisation de nombreux dispositifs optiques non linéaires, électro-optiques, laser et scintillateurs. Il s'agit donc d'une approche pluridisciplinaire allant de la chimie à la physique, des propriétés aux techniques d'élaboration et de mesure. Le Club JNCO est une émanation du réseau Cristaux Massifs, micro-nano-structurés et Dispositifs pour l'Optique (CMDO+) du CNRS et avec lequel il est toujours en étroite collaboration.

Le Club Couches Minces doit sa création à l'omniprésence des couches minces optiques dans un nombre toujours croissant de secteurs industriels, comme l'aérospatial, l'espace, le militaire, les télécommunications et la santé. Dans la plupart des cas, elles constituent un élément clé des performances ultimes des systèmes optiques. La prise en compte des nouvelles applications nécessite une forte structuration spatiale, ce qui a conduit à une forte convergence d'approche avec des techniques initialement développées dans le secteur de la microélectronique. De plus, l'évolution vers le traitement optique des très



Visualisation de la diffraction grâce au Kit Light Box conçu par la Commission enseignement en collaboration avec l'association Atout Sciences.

courtes longueurs d'onde fait appel à des dimensionnements relevant des nanotechnologies.

JNOP est concerné par le développement des matériaux organiques ou hybrides organiques-inorganiques qui commencent à offrir de nouvelles opportunités en termes de performances optiques et de fiabilité. Les enjeux stratégiques et économiques de cette filière en pleine maturation proviennent notamment de la nécessité de pouvoir disposer, à moyen terme, de composants de génération et de traitement de la lumière dans des conditions économiquement viables, et que les autres technologies peinent à satisfaire, notamment en matière de coût et de volume de production.

Applications

Le Club OMW a pour objectif la création de conditions propices à un rapprochement effectif entre les ingénieurs et les chercheurs de l'optique et des micro-ondes. L'interface entre les techniques et les technologies optiques et électroniques est devenue un domaine d'intérêt majeur avec des synergies de plus en plus marquées dans de nombreux domaines d'applications. Les grands thèmes d'intérêt pour la communauté OMW sont les dispositifs optoélectroniques à haut-débit, la photonique intégrée et micro-ondes, les techniques photoniques pour la génération et la distribution de signaux micro-ondes,

le traitement, la détection et la mesure par des systèmes optiques micro-ondes, les techniques et applications photoniques micro-ondes, le THz et les antennes, les techniques radio sur fibre, communications fibrées, sans fil et 5G, la photonique micro-onde dans les systèmes embarqués, les oscillateurs et la métrologie.

PIO œuvre dans le domaine de l'imagerie optique qui connaît des progrès conceptuels et technologiques importants (super résolution, imagerie 3D, imagerie plénoptique, holographie numérique, compressive sensing) en rupture avec les approches « conventionnelles » de conception des systèmes ou de traitement de l'information. Ces progrès ont été rendus possibles par la miniaturisation et la « démocratisation » des capacités de calcul, mais surtout grâce à l'interaction toujours plus grande entre la physique de l'image, la conception optique, le traitement du signal et des images, et le développement de nouvelles technologies de capteurs.

Le périmètre de JRIOA comprend les systèmes d'optique adaptative pour l'astronomie et l'observation de l'espace depuis le sol, l'imagerie rétinienne, l'imagerie biomédicale et la microscopie, la focalisation et la mise en phase de lasers de puissance, les télécommunications optiques, l'observation à distance pour la défense et la sécurité.

Ces systèmes rassemblent les éléments et techniques suivants : analyseurs de front d'onde, détecteurs, miroirs déformables et dispositifs de correction de la phase, calculateurs temps réels dédiés, traitement des données et restauration d'images.

LIBS est le Club voué à la spectroscopie LIBS, une technique d'analyse élémentaire développée en France. Ses applications couvrent de nombreux domaines où des mesures *in situ* sont nécessaires, comme le contrôle en ligne dans l'industrie, la surveillance de l'environnement, la géologie,

LE DERNIER NÉ DES CLUBS SFO EST LE CLUB « JEUNES »

Ce Club répond au besoin des doctorants, post-doctorants, jeunes chercheurs et ingénieurs d'avoir un espace de discussion et d'échange qui leur soit propre, ainsi qu'au besoin de la SFO d'avoir des interlocuteurs « Jeunes » pour initier et mener des actions dédiées à leur communauté. Les premiers contacts ont eu lieu lors d'un apéritif « Jeunes » organisé le 7 juillet 2022 dans le cadre du congrès OPTIQUE Nice. Les échanges ont été enthousiastes, dans un grand bouillonnement d'idées ! Un petit groupe de jeunes hyper motivés a ensuite accepté de s'impliquer dans ce Club et en a élaboré la charte qui a été signée dès novembre 2022. Peuvent adhérer à ce Club les jeunes opticiens et photoniciens, de l'étudiant en master ou en école d'ingénieur au jeune chercheur ou ingénieur, mais aussi les associations de jeunes en lien avec l'optique et la photonique, notamment les chapitres étudiants (Student Chapters) créés localement.

Ce club a déjà un bilan très actif : organisation d'une session aux JNOG à Lyon en présence d'Alain Aspect et d'une « Early Stage Researcher Session » à la conférence EOSAM 2023 à Dijon, interaction avec le CA de la SFO pour la construction de la plateforme PhD / Optique & Photonique portée par la SFO et le Réseau National des Ecoles Doctorales (REDOC). Des actions facilitant l'insertion professionnelle des jeunes diplômés ou coordonnant des journées de vulgarisation devraient aussi rapidement voir le jour.

Un grand bravo à ce jeune Club « Jeunes » !

Agnès Desfarges-Berthelemot, Inka Manek-Honniger, Marie-Claire Schanne-Klein.

l'exploration planétaire, le patrimoine culturel, la science nucléaire, etc. La micro-analyse et la cartographie élémentaire présentent également un intérêt significatif, en particulier pour la biologie et la science des matériaux.

Le Club Calcul Optique porte sur un vaste champ d'applications qui constitue souvent un élément clé des performances ultimes des systèmes optiques et surtout de leurs coûts de fabrication. Son intérêt s'est encore accru depuis l'émergence de nouvelles techniques de fabrication d'optiques, comme l'optique moulée, l'optique usinée ou l'optique diffractive, qui ouvrent le champ à de nouvelles combinaisons optiques toujours plus pointues. De plus, les outils de calculs optiques deviennent de plus en plus performants et plus abordables, tant en prix qu'en aisance d'utilisation.

Le CDOP concerne les diagnostics optiques et photoniques, avec la mise au point de méthodes nouvelles ou l'optimisation des méthodes existantes pour le développement de tous les secteurs d'applications. Les aspects liés à la validation expérimentale par moyens optiques et par modèles numériques sont naturellement un thème d'intérêt. Le CDOP est né de la fusion en 2017 entre les anciens Clubs CMOI et Fluvisu et couvre

ainsi un large champ transdisciplinaire où l'optique et la photonique se marient avec les sciences des matériaux, l'acoustique, la mécanique des solides et la mécanique des fluides, la biologie, la chimie, l'électronique et l'informatique pour repousser les limites de la connaissance ou pour proposer des solutions industrielles au cœur de l'innovation et des nouvelles technologies numériques.

Le Club LIDAR regroupe les acteurs de cette instrumentation en plein essor dans de nombreux domaines d'applications. Son périmètre inclut les activités suivantes : le développement instrumental et d'exploitation scientifique des systèmes lidar, la caractérisation par lidar de milieux gazeux (atmosphère), solides (aérosols, véhicules, objets divers) ou liquides (bathymétrie, applications sous-marines), les systèmes lidars fixes ou embarqués (véhicules, avions, drones, satellites) et les méthodes de traitement et algorithmes appliqués aux données Lidar.

Conclusion

Cet article est l'occasion de montrer que notre SFO est pleine de vitalité pour ses 40 ans. Clubs et Commissions sont autant d'entités actives sur lesquelles la SFO peut déployer une action efficace et bien ancrée sur la réalité des différentes communautés de la photonique. Le périmètre des Clubs n'est évidemment pas figé dans le temps, et de nouveaux Clubs sont susceptibles d'être créés. Tel est le cas du Club Jeunes SFO créé cette année et déjà fort actif (voir encadré). ●

RÉFÉRENCES

- [1] <https://www.sfoptique.org/pages/la-sfo-notre-societe-savante/les-clubs-sfo/>
- [2] <https://www.sfoptique.org/pages/sfo/lightbox.html>
- [3] <https://hal-sfo.ccsd.cnrs.fr/>
- [4] <https://www.sfoptique.org/pages/la-sfo-notre-societe-savante/les-clubs-sfo/commission-optique-sans-frontieres/>

La photonique en Île-de-France



La Région Île-de-France est l'un des viviers de la photonique française et le plateau de Saclay en constitue l'un des berceaux. C'est dans cet écosystème vivifiant, que s'inscrit le Hub Optics & Photonics de Systematic Paris-Région, représentant à lui seul 216 entités, dont 111 PME, 7 ETI, 25 Grands Groupes, 54 Académiques et 19 autres institutions.

<https://doi.org/10.1051/photon/202312028>

Jean-François Vinchant, Bruno Palpant,
Patrick Georges, Samuel Bucourt, Olivier Pluchery,
Badr-Eddine Benkelfat, Christophe Simon-Boisson,
Thomas Antoni, Najwa Abdeljalil*

* Najwa.abdeljalil@systematic-paris-region.org

Un Vivier académique solide et prometteur

La photonique en Île-de-France a conquis ses lettres de noblesse de longue date avec d'illustres précurseurs tels Augustin Fresnel, Jean-Baptiste Soleil, Hippolyte Fizeau (premier à mesurer la vitesse de la lumière en 1849), Charles Fabry ou encore Jean Jerphagnon. Ces noms illustrent la fructueuse collaboration entre centres de recherche en photonique et organisations industrielles qui se traduit aujourd'hui notamment par l'émanation de très nombreuses start-up.

De par ce vivier académique [1], l'Île-de-France bénéficie aussi d'une offre inégalée en Europe en termes de formations et de centres de recherche en photonique. Les formations post-bac s'étendent du niveau BTS / BUT au niveau doctorat, en passant par licences, masters et diplômes d'ingénieur. **L'Institut d'Optique Graduate School (IOGS)** est un établissement d'enseignement supérieur et de recherche qui mène des activités de recherche, d'innovation et de formation dans tous les domaines de l'optique et de la photonique sur trois campus universitaires : Paris-Saclay, Saint-Etienne et Bordeaux. L'IOGS forme environ 150 ingénieurs (SupOpticiens) chaque année, sous statut étudiant ou sous statut apprenti. Ils reçoivent une formation approfondie en photométrie et détection, laser, conception optique et instrumentation optique, à la fois théorique et pratique. Les spécialisations sont diverses: apparence et vision, télécommunication optique, optique et numérique, interaction lumière-matière, nanosciences, biophotonique, quantique, ingénierie des systèmes optiques...

La recherche à l'IOGS couvre de nombreuses thématiques au sein de trois laboratoires de recherche associés au CNRS et aux universités : le Laboratoire Charles Fabry (Palaiseau), le Laboratoire Hubert Curien (St-Etienne) et le Laboratoire Photonique, Numérique et Nanosciences (Bordeaux). Plusieurs start-up telles que Muquans (Exail), Damae Medical ou Pasqal en sont issues.

Sorbonne-Université (22 000 étudiants en sciences) propose plusieurs diplômes axés sur l'optique de niveau BAC+3, Bac+5 et Bac+8. Par exemple, la Licence pro Instrumentation, Optique et Visualisation (LIOVIS), le Master Astronomie, astrophysique et ingénierie spatiale (AAIS), le Master Lumière Matière Interactions

(LUMI) ou encore le Master Ingénierie Optique (MIO). Des matières telles que l'optique des matériaux, l'optique quantique et les nanotechnologies y sont enseignées. Par ailleurs, en 2022, une formation de M2 d'Information Quantique a ouvert ses portes incluant des cours d'informatique et d'optique quantique. Les étudiants issus de ces formations peuvent choisir de démarrer une carrière en entreprise ou poursuivre par une thèse en photonique. À Sorbonne Université, plusieurs laboratoires d'excellence avec des directions de recherche centrées sur l'optique sont implantés. Par exemple le Laboratoire Kastler Brossel, le Laboratoire Atmosphères, Observations Spatiales (LATMOS) ou l'Institut des Nanosciences de Paris ayant permis la création de start-up telles que LightOn, Welinq etc.

De son côté, l'**Université Paris-Saclay** délivre chaque année 200 ingénieurs et 60 docteurs spécialisés en optique et photonique, ce qui en fait l'un des principaux centres mondiaux dans ce domaine. L'Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay, accueille des étudiants internationaux au sein du master *Molecular Nano Bio PHOTonics (MoNaBiPHOT)* qui forme aux fondements théoriques et à la pratique expérimentale de la photonique, en interface avec d'autres disciplines (chimie, biologie, électronique). En association avec l'IOGS, mentionnons également le Master « Quantum, Light, Materials, and Nano Sciences » (**QLMN**) qui propose une formation Bac+5 dédiée à la nanophotonique, le photovoltaïque, les lasers, les capteurs, l'imagerie, les technologies quantiques... Aussi, CentraleSupélec, école d'ingénieurs généraliste, propose sur le campus de Paris-Saclay une mention en Ingénierie Quantique qui accueille chaque année une trentaine d'élèves. Cette formation leur permet de se former aux sciences et technologies nécessaires au développement du secteur

quantique au plus près des besoins des entreprises et des laboratoires publics environnants (notamment Thales, IBM, le CEA, PASQAL, Quandela). L'optique y prend une part importante en tant que technologie habilitante à travers les lasers ou les systèmes en champs proches, mais également en tant que formalisme à la base des ordinateurs quantiques.

La qualité et la capacité de ces formations repose fortement sur leur proximité avec des laboratoires dynamiques, liés à l'optique. Par exemple, le site de Saclay propose diverses plateformes de classe mondiale (Synchrotron SOLEIL, Laser à électrons libres IR, Plateforme laser attoseconde X-UV, Centrale de nanotechnologies du C2N, etc.). Non loin de là, l'Institut Polytechnique de Paris héberge le Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (LULI) et le Laboratoire d'Optique Appliquée (LOA).

L'optique et la photonique sont également au cœur de certains parcours de formation dispensés par l'**Institut Polytechnique de Paris** [2], dont Télécom SudParis et Télécom Paris sont deux des écoles membres. Ces programmes [3], traitent à la fois de *l'optique quantique* et des *dispositifs photoniques* dédiés au traitement et au transport des données dans les réseaux de nouvelles générations mais aussi de la *biophotonique* et de *l'imagerie optique* pour la santé et les sciences du vivant.

Les activités de recherche en communications optiques de Télécom SudParis et Télécom Paris, qui contribuent à ces programmes, portent sur les composants opto-électroniques, les technologies quantiques mais aussi sur les transmissions à très haut-débit et le traitement de l'information. Ces technologies photoniques sont également mises à profit pour la réalisation d'architectures et de processeurs dédiés au calcul neuro-morphique et au traitement haute performance des données, ●●●

Le Hub comprend une gouvernance et un comité de pilotage rassemblant une quarantaine d'experts œuvrant au dynamisme de l'écosystème. Ces experts ont mis en place la feuille de route du Hub et participent activement à l'expertise de projets de R&D. Au cours de la phase IV des pôles 73 % des projets labellisés par le Hub ont été financés.

MEMBRES DU COMITÉ DE PILOTAGE





I Bâtiment 503 à Orsay entièrement rénové fin 2023

notamment pour le bio-médical. Un secteur d'activité (ou domaine applicatif) pour lequel sont menés des travaux sur l'imagerie computationnelle et le développement d'outils de diagnostic.

Zoom sur les Grand- Groupes

Plusieurs grands groupes français fortement implantés en région Île-de-France ont des activités importantes en photonique portant sur la totalité du cycle de vie des produits, depuis la R&T (par exemple le centre de Recherche Thales Research & Technology basé à Palaiseau) jusqu'à l'aval au travers du soutien des produits, en passant par la R&D et la production. Ces activités conduisent à la fabrication et à la vente de produits et solutions photoniques, incluant des systèmes optroniques pour la défense (Safran et Thales, leaders Européens de l'optronique de défense), des systèmes laser pour les marchés civils en science, industrie et espace (Thales, leader mondial des lasers haute intensité), des composants optiques de très haute performance (Safran-Reosc) ou des verres optiques pour la lunetterie (Essilor, leader mondial du domaine). De très grandes entreprises de différentes branches industrielles utilisent également la photonique comme technologie capacitante clé pour leurs propres produits, Valeo en est une parfaite illustration. Pour consolider et développer leurs activités liées à la photonique, les grands groupes implantés en Île-de-France font également largement appel au tissu Francilien de PME et ETI du secteur photonique. Par ailleurs, au-delà de leurs activités internes de R&T, les grands groupes développent de nombreuses

collaborations avec les acteurs académiques de la région, allant de thèses CIFRE jusqu'à la mise en place de laboratoires communs de recherche.

Une émanation de start-up à la pointe de la technologie

L'écosystème francilien est extrêmement favorable à la création de start-up. Comme décrit précédemment, il dispose d'un réseau académique, apporteur d'idées et de technologies, de filières de formation engendrant les compétences, d'un tissu industriel composé de grands groupes, d'ETI et de PME, gage de la proximité des marchés et de leur dynamisme; et, pour renforcer le lien entre toutes ces entités, la Région dispose de nombreux organes de valorisation, d'accélération et de réseautage auxquels Systematic Paris-Region prend part. Sans oublier les outils de financement accessibles tant au niveau régional que national, pour tout type de projets depuis l'idée à la mise sur le marché. Le Hub Optics & Photonics de Systematic labellise chaque mois plusieurs projets avec un fort taux de succès. Ainsi, le Comité de pilotage du Hub a vu la création de plusieurs start-up durant la phase IV des pôles. Diverses start-up photoniques ou s'appuyant fondamentalement sur la photonique, tout domaine confondu ont vu le jour dans la région. Quelques exemples emblématiques: Damae Medical, Imagine Eyes, Karthala System (biotech/microscopie), Quandela et Pasqal (ordinateur quantique), Mirsense et Iumtek (spectroscopie), Lynx (AR/VR)... Pour permettre à ces start-up de s'établir, puis de se développer, différents incubateurs sont à disposition, en dehors des laboratoires eux-mêmes lorsque la technologie en est issue. Nous pouvons citer ●●●



Sur Mars, les lasers de Thales des rovers Curiosity et Perseverance ont franchi le cap du millionième tir laser à la recherche de signes de vie passée.
Crédit photos : @ NASA/JPL-Caltech

Incuballiance (Orsay) qui a accompagné plus de 360 entreprises (dont plus de la moitié lauréat i-Lab et une part notable en photonique) ou la FIE (Formation Ingénieurs -Entrepreneuriat de l'IOGS) qui a accompagné de très belles réussites telles que Damae Medical ou Effilux [4]. Le bâtiment 503 à Orsay, en pleine rénovation, est le lieu emblématique de la FIE et devient également aujourd'hui un lieu d'accueil pour les PME photonique sur un espace de 9000 m². Des incubateurs plus médiatiques sont aussi présents sur le territoire : Station F et Agoranov (Paris), le Bio Park (Villejuif) etc... À noter également : l'incubateur « les Premières » pour l'accompagnement des femmes entrepreneures et « La paillasse », incubateur scientifique responsable.

Zoom sur la photonique quantique

Avec le plan quantique de 1,8 Md€ lancé par le gouvernement en 2021, la France a pris sa place dans la course à la 2nde révolution quantique, celle qui est basée sur les expériences d'intrication quantique.

Au niveau régional, le réseau francilien QuantIP (Quantum Technologies in Paris Region) financé par la Région Île-de-France fédère, dans le domaine des technologies quantiques, un ensemble d'équipes académiques au meilleur niveau mondial et un vivier de start-up, d'entreprises franciliennes. La création du « Paris Center for Quantum Computing » à Paris et de « Quantum Saclay » en Essonne a pour ambition d'accélérer les sciences et technologies quantiques, de la formation à l'innovation pour positionner la Région Île-de-France en leader de cette thématique tant au niveau national qu'europpéen, technologies également centrales sur la feuille de route du Hub Optics & Photonics. Le cœur des technologies quantiques est le qubit,

l'analogue quantique du bit informatique, celui qui est à l'œuvre dans nos ordinateurs depuis 50 ans. Aujourd'hui plusieurs familles de qubits existent dont le qubit optique basé sur la production de photon unique. Celui-ci est en "compétition" avec les qubits supraconducteurs, les ions ou atomes piégés, les atomes artificiels ou le spin d'électrons dans un semiconducteur [5].

Alain Aspect (Prix Nobel de Physique 2022) l'un des acteurs de cette 2nde révolution quantique explique : « Ainsi le photon est un qubit quasi idéal, mais il a une limite majeure : il s'agit d'un qubit volant, on ne peut pas l'arrêter. Il permet donc de transporter l'information quantique mais pas de la stocker. Si l'on veut un système complet de traitement quantique de l'information, il faut aussi disposer de qubits quantiques statiques qui conserveront l'information quantique pendant le temps suffisant pour effectuer les opérations souhaitées. Pour le moment les mémoires quantiques restent un point d'achoppement car elles peinent à conserver l'information efficacement durant plus de quelques dizaines de microsecondes, ce qui est trop peu [6] ».

Dans cet effort mondial pour établir des technologies quantiques et à terme l'ordinateur quantique, une singularité est certainement l'émergence de nombreuses start-up assurant le transfert des expériences de laboratoires vers des technologies qui pourront s'insérer sur le marché. Pasqal créée en 2019 développe un ordinateur quantique basé sur les atomes de Rydberg. Weling (2022) développe des mémoires quantiques pour interconnecter les processeurs quantiques. Quandela (2017) a mis au point une source de photons uniques à base de boîtes quantiques et développe un ordinateur quantique optique complet.

D'autres acteurs majeurs, en collaboration avec les laboratoires académiques, développent d'autres applications telles que des capteurs quantiques à base d'impuretés dans le diamant (Thales), des gravimètres quantiques à base d'atomes froids (Exail, Onera) et des protocoles de cryptographie quantique pour sécuriser les réseaux de télécommunications optiques (Nokia, Orange).

Zoom sur le spatial

Le spatial est l'un des thèmes majeurs de notre feuille de route. De plus en plus, par sa vélocité, sa puissance, ses propriétés et son ergonomie, la lumière devient un enjeu de taille pour les technologies spatiales. La région Île-de-France est l'un des fers de lance de ce secteur avec de nombreuses réalisations de pointe.

Cela fait déjà deux ans que le rover Persévérance s'est posé sur Mars. A son bord, l'instrument SuperCam équipé d'un laser fourni par Thales et destiné à analyser, caractériser et sélectionner des échantillons de roches martiennes.

Une architecture opto-pyrotechnique pour les chaînes d'activation de la future Ariane 6 sera l'une des innovations de ce nouveau lanceur. SEDI-ATI fournira des composants utilisant la fibre optique pour vérifier l'intégrité de ces lignes opto-pyro au niveau du lanceur et des satellites.

Les communications optiques par satellites deviennent aussi un enjeu considérable. Sébastien Bigo, Directeur des réseaux optiques de Nokia-Bell Labs, parie que les technologies numériques cohérentes seront aussi révolutionnaires dans l'espace qu'elles ne l'ont été dans les réseaux fibres optiques terrestres.

Conclusion

Ainsi, la Région Ile de France dispose d'un tissu industriel photonique à la pointe de la technologie qui ne cesse de s'accroître encouragé par des collaborations fructueuses entre l'ensemble des partenaires. L'ambition du Hub Optics & Photonics du Pôle Systematic est d'être un acteur reconnu du secteur pour assurer la promotion de la filière et fédérer la communauté d'Île-de-France, tout en restant connecté à la France, à l'Europe et au monde! ●

RÉFÉRENCES

[1] Vu la richesse et la variété de formations incluant l'optique en Île de France, il est impossible de dresser un panorama complet, nous avons ainsi fait le choix de mettre en valeur les entités et formations des membres du Comité de Pilotage du Hub Optics & Photonics. Si le lecteur cherche une liste plus à jour il peut se reporter à « L'annuaire des formations en optique-photonique », édité par Photoniques en partenariat avec Photonics France.

[2] École Polytechnique, ENSTA Paris, ENSAE Paris, Télécom Paris et Télécom SudParis sont les cinq établissements membres de l'Institut Polytechnique de Paris.

[3] Mentions de Master : Physique, Biologie et Santé, E3A, Mécanique.

[4] Bâtiment 503 à Orsay entièrement rénové fin 2023.

[5] N° Spécial de Sciences et Avenir « Quantique, la révolution du XXI^e siècle » n°902 p.44 (avril 2022).

[6] Entretien avec Alain Aspect. Propos recueillis par Philippe Pajot. La Recherche n°568 p.23 (janvier 2022).

Opton Laser International est un distributeur français de produits de haute technologie dans le domaine de la Photonique. Notre PME a acquis depuis plus de 30 ans une réputation d'innovation et d'excellence de services, en particulier dans les domaines du laser et de la spectroscopie, mais également de la microscopie, de l'opto-mécanique, du traitement du signal et de l'instrumentation pour lasers.

Basés aux Ulis, nous restons l'un des rares acteurs indépendants du secteur. Notre succès et notre réputation prennent leur source dans la réactivité et la flexibilité de l'entreprise, combinés avec la stabilité d'une équipe dont la compétence est reconnue sur le marché. Opton Laser propose une expérience client à 360°, de l'avant à l'après-vente. En janvier 2023, nous avons étendu nos activités à la Suisse francophone.



Particulièrement actif dans le laser, quelques exemples des sources que nous proposons :

- Laser IR et Mid IR : diodes DFB, ICL, QCL, lasers QCL accordables en cavité externe, lasers CO₂
- Diodes laser ps pour la florescence résolue en temps
- Lasers pompés par lampes de forte énergie, OPO forte puissance
- DPSS cw et impulsionnels
- Lasers ultrafast (ps et fs)
- Peignes de fréquences
- Led multi-longueur d'onde

Opton Laser International est membre fondateur d'Allied Photonics, une association d'entreprises européennes indépendantes du secteur de la photonique, partageant philosophie, principes éthiques et mettant en commun leur expertise technique. ●

Contact : Laurence Duchard, Directrice
 Laurence.duchard@optonlaser.com
 www.optonlaser.com
 01 69 41 04 05