N°118

Photoniques

LA LUMIÈRE ET SES APPLICATIONS

40 ANS DE LA SFO
Histoire de la SFO

ENTRETIENS
Sophie Brasselet
Denis Barbier

OSEZ L'OPTIQUE
Des défilés de modes... dans un bus

ACHETER
Une prestation de procédés laser

DOSSIER

LASERS DE PUISSANCE

- LASERIX : une plate-forme pour le développement large spectre d'applications de la lumière intense
- Le laser XCAN : façonner la lumière en mode digital
- De l'ultra-rapide à l'ultra-intense : de nouveaux champs d'études

+

L'endommagement laser sur les lasers de puissance

France/EU : 19 € | Reste du monde : 25 €

Nouvelle décennie
Nouveau logo
Même mission

20 YEARS

EPIC
EUROPEAN PHOTONICS INDUSTRY CONSORTIUM

Accroître la compétitivité de l'industrie européenne de la photonique

EPIC est la principale association industrielle mondiale qui s'engage à promouvoir un développement durable des organisations travaillant dans le domaine de la photonique en Europe et dans le monde. Nous soutenons l'écosystème photonique en maintenant et consolidant un réseau solide et en agissant comme catalyseur et facilitateur du progrès technologique et commercial.

www.epic-assoc.com/20years

Photoniques

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),
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 : Mars 2023
Routage : STAMP (95)

Éditorial

NICOLAS BONOD
Rédacteur en chef

En route !

Le 5 décembre 2022, les équipes du National Ignition Facility à Livermore sont parvenues à générer pour la première fois de l'histoire une fusion nucléaire produisant plus d'énergie que les faisceaux lasers n'en ont fourni à la cible. Cette étape cruciale ouvre la voie vers un nouvel horizon, celui d'une fusion nucléaire contrôlée, source d'énergie à partir d'éléments légers et abondants. La route sera longue et difficile pour développer une installation laser capable de produire de l'énergie à partir d'une fusion nucléaire contrôlée. Mais cet horizon, par son enjeu colossal, motivera de nouvelles approches, de nouvelles installations et de nouveaux investissements autour des technologies lasers.

La France possède une forte expertise dans le domaine des installations lasers de haute puissance et de haute énergie. Elle peut s'appuyer sur un tissu dense de laboratoires et d'entreprises à la pointe de ce domaine pour développer de nouveaux projets ambitieux et repousser les limites de l'interaction entre la lumière et la matière. Avec XCAN, LASERIX, ATTOLab, UHI100, ce numéro met à l'honneur quelques-unes des installations lasers de puissance les plus performantes du territoire. Le contenu d'un numéro consacré aux lasers ne pouvant manquer de cohérence, les rubriques Comprendre et Acheter sont en lien avec ce dossier. Tout d'abord, l'article Comprendre l'endommagement laser sur les lasers de puissance vous expliquera tout sur ce phénomène qui limite la montée en puissance des chaines lasers ainsi que la durée de vie de leurs optiques. Quant à l'article Acheter une prestation laser, il met en lumière la richesse de l'offre et la diversité des domaines visés par les plateformes de procédés laser. Je vous invite aussi à aller en page 14 pour vous confronter à la grille de mots-croisés, grille qui vous surprendra par la richesse de son contenu lui aussi dédié au thème de ce numéro!

Prenons la route encore avec le Scientibus et émerveillons-nous devant les expériences d'optique décrites dans l'article Des défilés de modes... dans un bus. Le Scientibus, c'est un formidable collectif à l'origine de l'une des plus belles initiatives de promotion des sciences pour les plus jeunes. Ce collectif a réussi la prouesse de proposer dans un cadre mobile et original de magnifiques expériences dévoilant les fabuleuses propriétés de la lumière à un public large. Nous ne remercierons d'ailleurs jamais assez la Société Française d'Optique et le collectif du Scientibus d'avoir permis aux participants du congrès Optique Nice 2022 de découvrir ces expériences tout aussi belles qu'intrigantes.

De nombreuses routes s'ouvrent pour l'optique et photonique. Sachons les emprunter et transmettre notre passion à la nouvelle génération pour aller relever les défis à venir en développant des projets ambitieux et novateurs. Je vous souhaite une bonne lecture.

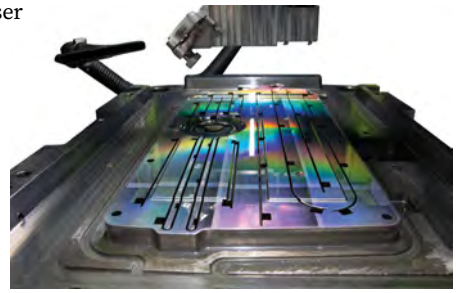
Sommaire

www.photoniques.com N° 118

20 LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE D'OPTIQUE A QUARANTE ANS

35 Le laser XCAN : façonner la lumière en mode digital

53 Acheter une prestation de procédés laser



ACTUALITÉS

03 Éditorial et actualité de la SFO
06 Informations partenaires
14 Mots croisés
15 Entretien : Sophie Brasselet, Institut Fresnel
18 Entretien : Denis Barbier, Microlight 3D
20 Préserver l'intrication quantique de la diffusion
21 Dévier la foudre à l'aide d'un laser intense

40 ANS DE LA SFO

22 Histoire de la SFO

OSEZ L'OPTIQUE

25 Des défilés de modes… dans un bus

DOSSIER : LASERS DE PUISSANCE

30 LASERIX : une plate-forme pour le développement large spectre d'applications de la lumière intense
35 Le laser XCAN : façonner la lumière en mode digital
40 De l'ultra-rapide à l'ultra-intense : de nouveaux champs d'études

COMPRENDRE

46 L'endommagement laser sur les lasers de puissance

ACHETER

53 Une prestation de procédés laser

PRODUITS

57 Nouveautés

Annonceurs

2B Lighting 19
Alphanov 55
Ardop 37
Comsol 51
Edmund optics 41
EDP sciences 31, 52
EPIC ..... IIe de couv.
HTDS 35
Imagine optic 33
ISP system 39
OBS fiber 43
Ophir 49
Opton laser ..... IVe de couv.
Oxxius 45
SFO 04
Scientec 23
Spectrogon 17
Spectros 21
Trioptics 47

Crédit photo (couverture) : © iStockPhoto

L'édito de la SFO

ARIEL LEVENSON
Président de la SFO

40 années d'histoire nous contemplent et nous n'allons pas nous arrêter en si bon chemin

40 ans de SFO, 40 ans d'efforts de bénévoles qui se succèdent, 40 ans pour bâtir une société savante dont nous pouvons être fiers. Cette épopée en continuelle évolution nous sera racontée tout au long de l'année en commençant dans ce numéro par un article écrit par deux de nos illustres membres, Pierre Chavel et Benoît Boulanger. Des focus suivront, qui mettront en lumière divers aspects de notre SFO, la richesse de notre communauté, ainsi que quelques actions à venir. Ce sera en particulier le cas du programme PÉPITES de l'optique française, qui vise à préserver notre riche patrimoine immatériel. A titre personnel, avant tout autre chose, SFO rime avec communauté et avec amitié et ce depuis mon tout premier COLOQ en 1990 qui a changé à la fois ma vie scientifique et bien plus que cela, et je sais ne pas être le seul…

Les 40e JNOG, du 5 au 7 juillet à l'Institut de Nanotechnologies de Lyon, résonnent avec l'anniversaire SFO, et JNOG se refait une jeunesse. En plus des habituels conférences, posters et salon industriel, les journées seront prises d'assaut par notre Club Jeunes, récemment créée, qui organisera un échange avec Alain Aspect, Prix Nobel de Physique 2022. Autre nouveauté, JNOG accueillera la cérémonie de remise du Prix Jean Jerphagnon, avec comme orateur invité un précédent lauréat, Nicolas Treps (LKB, Paris).

Pour continuer avec les évènements attendus en 2023, c'est un honneur et un grand plaisir pour la SFO de co-organiser avec l'EOS (European Optical Society) le congrès EOSAM 2023, du 11 au 15 septembre, au Palais des Congrès de Dijon. Ce sera surement un grand moment pour les communautés académique et industrielle de la photonique européenne et nous vous attendons très nombreux. Deux excellentes présentations plénières sont déjà connues, celles d'Ursula Keller (ETH, Zurich) et de Thomas Ebbesen (ISIS, Strasbourg), et d'autres bonnes nouvelles se préparent.

Comme le dit l'adage, « la prédiction est un art difficile, surtout lorsqu'elle concerne l'avenir », mais une étude récente* donne froid dans le dos. Dans cette étude les publications parues entre 2008 et 2020 sont classées selon les prénoms des auteurs. Puis ces données sont extrapolées pour chercher l'année où le nombre des publications rédigées par des femmes égalerait celui des publications rédigées par des hommes. En physique ce croisement se passerait en… 2158 ! Quelles que soient les précautions que l'on prenne et les erreurs, inévitables, associées à une telle extrapolation, la probabilité est faible que ce croisement se produise durant ce siècle, à moins que l'on agisse plus vite, plus fort. Du point de vue des prospectivistes, on pourrait dire en effet qu'on est en présence d'une tendance lourde, mais non inéluctable, et l'action garde donc tout son sens. Je suis ravi et très reconnaissant des efforts conduits par les collègues Caroline Champenois et Nathalie Westbrook, co-présidentes de notre commission « Réussir la parité en optique », pour élargir d'une manière conséquente le comité afin d'accélérer le déploiement d'actions qui sans constituer l'alpha et l'oméga contribueront, à n'en pas douter, à faire avancer une noble cause et un engagement fort de la SFO.

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

* « Equity for woman in science », Cassidy R. Sugimoto and Vincent Larivière, Harvard University Press (2023)

AGENDA

■ **CLUB JiONC de la SFO**
18e édition des JOURNÉES IMAGERIE OPTIQUE NON CONVENTIONNELLE,
Institut Langevin à Paris 5e
Mars 30 - 31, 2023

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

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

■ **JNOG Lyon 2023**
SFO Colloque - JNOG Club 40e édition des Journées Nationales d'Optique Guidée, l'Institut des Nanotechnologies de Lyon
5 au 7 juillet 2023

■ **EOSAM 2023 in Dijon**
SFO and EOS shared organization Palais des congrès de Dijon, France
September 2023 11- 15, 2023

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

PARRAINAGES SFO

■ **C'Nano 2023 : The nanoscience meeting**
Du 15/03 au 17/03
à Poitiers

■ **9e Congrès de la Société Française de Physique**
Du 3 au 7/07/2023, Paris

■ **20th International Conference on Luminescence - ICL 2023**
Du 27/08 au 1/09/2023 Paris

Retrouvez tous les évènements de la SFO sur https://www.sfoptique.org/

EOSAM Dijon 2023 Coorganisé par la Société Française d'Optique & l'European Optical Society au Palais des Congrès de Dijon

Du lundi 11 au vendredi 15 septembre 2023, le palais des congrès de Dijon accueillera la communauté européenne de l'Optique et de la Photonique dans une ambiance conviviale propice à l'échange autour des très divers domaines de la photonique. Vous pouvez dès à présent déposer votre article sur la plateforme EOSAM Dijon 2023 et vous inscrire dans un des 9 TOMs :

- TOM1- Silicon Photonics and integrated optics
- TOM2- Adaptive and Freeform Optics
- TOM3- BioPhotonics
- TOM4- Nanophotonics
- TOM5- Optical Materials
- TOM6- Nonlinear and Quantum Optics
- TOM7- Optical frequency combs
- TOM8- Ultrafast Optics
- TOM9- Applications of Optics and Photonics

Suivez-nous sur www.sfoptique.org & www.europeanoptics.org

L'exposition industrielle est ravie de vous accueillir

Cette 11e édition de ce grand congrès européen annuel a également pour vocation d'accueillir une grande exposition industrielle. Un espace d'expositions industrielles constituera ainsi un terrain propice aux échanges entre industriels et académiques venus de toute l'Europe. La présence de start-ups est fortement encouragée à EOSAM Dijon 2023.

Réservez dès maintenant et profitez des Tarifs EarlyBird

L'appel à communications est ouvert

Le Comité scientifique d'Organisation sous la présidence de Bertrand KIBLER (ICB, SFO), Guy MILLOT (ICB, SFO), Patricia SEGONDS (Présidente EOS), et Emiliano DESCROVI (EOS) mettent tout en œuvre pour que EOSAM Dijon 2023 rime avec excellence scientifique, convivialité et inclusion et soit un événement mémorable pour notre recherche française et européenne.

40e Journées Nationales d'Optique Guidée

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

La plateforme des soumissions est ouverte

Rejoignez les orateurs invités, Stéphane BLIN, Nadège COURJAL, Guillaume LAFFONT, Delphine MORINI, Fabienne SALIOU et Benjamin WETZEL.

Session du Prix Jean Jerphagnon

Orateur invité Nicolas TREPS du LKB
Session exceptionnelle avec Alain ASPECT, Prix Nobel de Physique 2022
une table ronde organisée par le club Jeunes de la SFO.

L'exposition industrielle est ouverte à la réservation

Rejoignez WAVETEL, LUMIBIRD, 2 B LIGHTING TECHNOLOGIES, EXAIL (IXBLUE) et FC EQUIPMENTS.

CONGRÈS DE LA SFO

Société Française d'Optique

01/05 juillet 2024

OPTIQUE

NORMANDIE

VENEZ À ROUEN

2024

www.sfoptique.org

rubrique congrès OPTIQUE

AGENDA DE LA FORMATION CONTINUE

- **SC2 - Méthode de fabrication et contrôle de systèmes optiques**
  08 au 10 Mars 2023
- **Bases de l'optique**
  14 au 17 Mars 2023 et 28 au 31 Mars 2023
- **EF3 – Photométrie et radiométrie (photométrie des instruments, mesures d'éclairement, colorimétrie)**
  04 au 07 Avril 2023
- **SC9 - Systèmes optiques d'imagerie (viseurs, objectifs, zooms, télescopes, lunettes)**
  11 au 14 Avril 2023
- **SC19 - Vision industrielle**
  18 au 20 Avril 2023
- **CO1 - Conception optique de systèmes d'imagerie avec Zemax®/OpticStudio – Initiation**
  15 au 18 Mai 2023
- **EF5 – Colorimétrie**
  22 au 23 Mai 2023
- **EF2 Bases de l'optique**
  15/11/2022 au 18/11/2022 et 29/11 au 02/12/2022
- **SC3 - Comprendre les sources laser**
  05 au 09 Juin 2023
- **CO_2IR - Conception optique de systèmes d'imagerie infrarouge avec Zemax®/OpticStudio – Avancé**
  06 au 08 Juin 2023
- **SC1 – Optomécanique**
  12 au 15 Juin 2023
- **CO_2VIS - Conception optique de systèmes d'imagerie visible avec Zemax®/OpticStudio – Avancé**
  19 au 21 Juin 2023

CONTACTS

Annie Keller
01 64 53 32 15
www.fc.institutoptique.fr
fc@institutoptique.fr

Retour sur la remise des diplômes de la promo 2022

La communauté photonique a accueilli le 9 décembre dernier 120 ingénieures et ingénieurs de plus ! C'est en effet à cette date que les élèves de la promotion 2022 de l'Institut d'Optique Graduate School ont reçu leur diplôme.

Crédit photo : SOAP.

Lancé de toques de la promo 2022

La cérémonie a eu lieu dans l'auditorium de Centrale-Supélec à Paris-Saclay en présence des familles. Retour sur ce moment de joie et d'émotions pour cette promo si particulière qui a vécu au cours de ses études la crise sanitaire.
Durant cette cérémonie, Rémi Carminati, Directeur Général de l'Institut d'Optique, a félicité les étudiantes et étudiants pour « ce diplôme d'ingénieur prestigieux ». Il les a invités à « être engagés » face aux défis auxquels nos sociétés doivent faire face et leur a assuré qu'ils seraient toujours les bienvenus à l'Institut d'Optique. Raphaël Clerc, Directeur Général Adjoint à l'Enseignement, a exprimé aux jeunes diplômés son admiration pour leur résilience et a souligné l'importance de la solidarité à tous les niveaux pour faire face aux épreuves.
Entre deux témoignages inspirants d'anciens élèves, Nafissa Hachimi Soba a pris la parole au nom de ses camarades pour évoquer les meilleurs souvenirs de ces 3 années.
La société Quandela, parrain de promo, représentée par un ancien élève, William Hease, est venue souhaiter un « avenir brillant » à ces jeunes ingénieures et ingénieurs, a présenté les défis liés aux développements de ses technologies et les a invités à rejoindre ses équipes !
Juste avant de recevoir leur diplôme des mains de leurs enseignantes et enseignants, la voix d'Alain Aspect, prix Nobel de Physique 2022, a résonné dans l'auditorium pour le plus grand plaisir de tous. Par message vidéo il a incité chacune et chacun à « suivre ses goûts » pour la suite de sa carrière. Cette belle cérémonie a été ponctuée par des intermèdes artistiques, et s'est achevée par un lancé de toques !

Une vocation pour l'enseignement : conférence d'Alain Aspect à l'université de Bordeaux

« Je vais faire ce que je fais de mieux, c'est-à-dire, expliquer la science ! »

© Gautier Dufau

Alain Aspect à l'université de Bordeaux

C'est ainsi qu'Alain Aspect, prix Nobel de physique 2022, a entamé sa conférence à l'université de Bordeaux le mercredi 25 janvier dernier. Dans la magnifique salle de l'Agora au domaine du Haut-Carré, il s'est adressé à l'ensemble de la communauté universitaire.
C'est d'une façon simple et décontractée que le physicien a expliqué l'évolution dans le temps des principes de physique quantique, et les conflits épistémologiques rattachés à la discipline. Tout d'abord tourné vers les scientifiques, son discours était technique, mais son message était plus largement destiné au grand public, pour montrer l'importance de la démarche scientifique.
Cet événement, co-organisé par l'université de Bordeaux et l'Institut d'Optique Graduate School, s'est poursuivi par un temps d'échanges avec une centaine d'étudiantes et étudiants, en parcours de physique, au sein de l'Institut d'Optique d'Aquitaine. En licence, en master, en doctorat ou en Erasmus à l'université, ils ont eu l'occasion de partager un moment privilégié avec le scientifique. Le chercheur a raconté l'origine de sa passion pour la physique avec notamment les « leçons de choses » à l'école, qui lui ont donné le goût de l'explication et la compréhension des phénomènes naturels grâce à des manipulations. Alain Aspect conclut énergiquement ces échanges ouverts avec ce jeune public : « Lancez-vous dans quelque chose qui vous passionne, les efforts viennent ensuite naturellement ».
Source : Université de Bordeaux

Jean-François Vinchant nommé VP PME
chez Systematic Paris-Région

Jean-François Vinchant, Président et CEO de SEDI-ATI Fibres Optiques, membre du CA de Photonics France et Président du Hub Optics & Photonics, a également été nommé, en décembre dernier, Vice-Président PME au sein de Systematic Paris-Région !

Depuis Juillet 2016, Jean-François Vinchant a repris SEDI-ATI pour maintenir cette activité en France. De formation ingénieur et docteur en électronique et optoélectronique, Jean-François Vinchant a passé près de 20 ans de sa carrière dans l'Optics Valley de l'Essonne au sein des sociétés d'Alcatel, Alcatel Optronics, Avanex et 3S Photonics. Après un an en Management Général à l'Essec, il a assuré de 2009 à 2016 la direction générale de Polycaptil à Besançon.
Jean-François Vinchant est également depuis 2008 expert en Photonique auprès de la Commission Européenne. Bravo à lui pour cet engagement sans faille !

PASQAL lève 100 millions d'euros
La société Pasqal, membre de Systematic, annonce une levée de fonds record pour le Quantique !

Fondée en 2019, PASQAL construit des ordinateurs quantiques à partir d'atomes neutres ordonnés en réseaux 2D et 3D. L'objectif est d'apporter un avantage quantique pratique à ses clients et résoudre des problèmes du monde réel.
La startup enchaine rapidement les succès : Lauréat I-Lab 2020, lauréat de la catégorie "Advanced Computing & AI" à Hello Tomorrow 2020, 1ère levée de fonds de 25 millions d'euros en 2021…etc L'équipe d'Antoine Browaeys et Thierry Lahaye à l'Institut d'Optique (IOGS, CNRS) a démontré depuis plusieurs années que la simulation de problèmes à plusieurs corps est intraitable pour les calculateurs haute performance classique. Depuis 2011, ils ont construit et amélioré des simulateurs quantiques programmables constitués de réseaux d'atomes neutres. En bref, s'il était encore besoin de le démontrer, PASQAL s'inscrit définitivement dans l'élan du plan quantique.
Toutes nos félicitations à PASQAL : comme à chaque levée de fonds quantique c'est tout l'écosystème des deep tech qui rayonne !
La start-up est active dans l'écosystème depuis 2021 et membre des Hubs Advanced Engineering & Computing et Optics & Photonics. Elle a notamment présenté ses actualités et projets partenariaux lors de la « Journée valorisation projets quantiques » – co-organisée par Systematic et Teratec – en décembre 2022 et sera présente dans le programme d'animations du pôle en 2023.

Vous souhaitez rejoindre le Hub Optics & Photonics Systematic ? Une question ? Un renseignement ?
Contactez Najwa Abdeljalil,
Coordinatrice du Hub :
najwa.abdeljalil@systematic-paris-region.org

TECHINNOV 2023
PROFITEZ DES TARIFS PRÉFÉRENTIELS POUR RÉSERVER VOS STANDS

Techinnov 2023 : grâce à un partenariat entre la CCI Ile-de-France et la CCI Essonne, organisatrices du salon Techinnov et Systematic, nos adhérents peuvent cette année bénéficier de tarifs préférentiels sur les stands. Profitez-en vite !
Vous êtes adhérents Systematic et souhaitez profiter de l'offre ?

- Étape 1: Contactez Aurélie Hard (CCI Essonne) au 07 62 04 21 93 ou par mail en précisant que vous êtes adhérent Systematic
- Étape 2 : Précisez vos besoins parmi les formules proposées (accès BtoBMeetings, corner ou stand, nombre de participants…)
- Étape 3 : Validez la proposition commerciale avec la CCI Essonne
- Étape 4 : Vous recevez un code d'accès personnalisé afin de pouvoir vous inscrire et bénéficier des remises en tant qu'adhérent Systematic Paris-Région

Cette année, Techinnov aura lieu le 28 mars, au Parc Floral de Paris.

En bref

Le projet OLINPIA porté par R&D VISION a été retenu par Bpifrance lors de la vague 8 du concours i-Nov !

OLINPIA est labellisé par les pôles de compétitivité Systematic Paris-Region et EuraMaterials. L'initiative de ce projet fait suite à plusieurs réalisations menées par R&D VISION dans le domaine agricole pour aider les filières à objectiver des mesures.

AGENDA

■ **Integrated photonics from visible to mid infrared: introduction to Si, SiN and SiGe platforms,**
11 mai 2023, (cours en ligne hébergé par PhotonHub Europe)

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

Retour sur la 5e édition du Transfo Digital Day

Le 8 décembre dernier nous étions présents à la 5e édition du Transfo Digital Day dont la thématique était les problématiques métiers des secteurs santé, agriculture, industrie aéronautique-mécanique et commerce.
Marc Sztulman, conseiller régional délégué au numérique à la Région Occitanie a présenté la stratégie régionale du numérique.
La journée a été rythmée par :

- **Une convention d'affaires Digitale is Future** avec des rendez-vous d'affaires personnalisés et planifiés en amont.
- **Une conférence plénière** – Quelles sont les problématiques métiers des secteurs Santé, Agriculture, Industrie aéronautique-mécanique et Commerce ?
- **Une table-ronde Santé** – Découvrez le futur de la formation en santé numérique.
- **Une table-ronde Agriculture** – AMI Occitanum : Comment répondre par le numérique à des besoins qualifiés de collectifs agricoles ?
- **Une table-ronde Industrie Aéronautique-mécanique** – Quelles solutions pour accompagner la transformation des entreprises industrielles ?
- **Une conférence LAB Microsoft** – La réalité virtuelle au service de la formation et de la performance opérationnelle dans l'industrie.
- **Une session Keynote Digitale is Future** – L'ère d'un nouveau leadership industriel : pourquoi l'industrie 5.0 change-t-elle la donne ?
- **Une table-ronde Digitale is Future** – Comment repenser une industrie résiliente, durable et centrée sur l'humain dans un environnement compétitif ?
- **Une session Défis / Pitch – Défis Techno/Solutions Agriculture – Robustagno.**
- **Un showroom innovation** – démonstrations des dernières innovations numériques pour les filières.
- **Un atelier** – Utilisation des données: l'approche éthique by design d'Ekitia.

Transfo Digital Day était organisé par l'agence AD'OCC, Digital 113 et Projet X avec le soutien de la La Région Occitanie / Pyrénées-Méditerranées et en partenariat avec les pôles de compétitivité Eurobiomed, Aerospace Valley, Mecanic Vallée, Agri Sud-Ouest Innovation ainsi que la FEDEO, la Fédération du e-commerce en Occitanie.

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

RETOUR SUR LE SAFE DRONE DAY

Le 24 janvier dernier nous avons eu le plaisir de participer au SAFE DRONE Day organisé par SAFE CLUSTER en partenariat avec, Région Sud - Provence-Alpes-Côte d'Azur, le C2RD Centre Régional de Ressource Drone, La Provence Verte, le CLUB Sud drones et les pôles SCS et OPTITEC.
Cette journée a été une opportunité pour les participants de :

- Suivre des tables rondes sur des thématiques telles que les "Territoires" avec le C2RD Centre Régional de Ressource Drone, l'Université Côte d'Azur, l'Aix-Marseille Université, le Centre d'Initiation et de Formation des Equipages Drones - CIFED et le #CEPN ou l' Emploi de Drones dans les filières des Travaux Publics en présence des entreprises NGE GENIE CIVIL, Escadrone et FAUCHÉ
- Découvrir l'offre de services drones en Urbanisme, Travaux Publics et Agriculture/Viticulture et une règlementation sur les études de risques SORA avec ELITE DRONE & Groupe Aéro Pyxis
- Participer à des démonstrations statiques et dynamiques (Groupe Atechsys - Elistair - Humans and Drones).
- Présenter la feuille de route du Club Sud Drone par son Président Bernard KLEYNHOFF.
- Détailler des informations sur la filière drone au niveau règlementaire (Stephane Vaubourg - EASA - European Union Aviation Safety Agency) ainsi que les services du pôle SAFE CLUSTER à destination de ses adhérents.
- Découvrir des solutions de Géolocalisation et Solutions de traitement de données embarquées par Magellium.
- Discuter et d'échanger avec l'ensemble des acteurs de la filières ainsi que des exposants présents (Elistair - NGE GENIE CIVIL - Geomesure - Fréquence Drone – Télépilote Magazine - CMAR_PACA)
- Visualiser le film réalisé en 2021 lors de la journée Drones à Port Pothuau.

Contact : Laetitia Commissaire, Directrice Adjointe - Affaires Générales
laetitia.commissaire@pole-optitec.com / +33 (0)6 07 70 82 58

AGENDA

Salon International de l'Aéronautique et de l'Espace
Du 19 au 25 juin 2023 au Bourget à Paris

Le Salon International de l'Aéronautique et de l'Espace est organisé par le SIAE, filiale du Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales (GIFAS).
Plus d'infos sur : https://www.pole-optitec.com/missions/view/22

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

Organisé tous les deux ans, Laser World of Photonics est le salon leader mondial pour les composants, les systèmes et les applications photoniques.
Plus d'infos sur : https://www.pole-optitec.com/missions/view/23

Photonics Bretagne et 17 adhérents
à Photonics West

Après une dernière édition au faible taux d'exposants et de visiteurs pour raison sanitaire, les entreprises françaises de photonique ont eu plaisir à se retrouver cette année à Photonics West à San-Francisco du 31 janvier au 2 février. Les visiteurs venus de tous pays étaient cette fois-ci au rendez-vous de cet événement phare pour l'industrie photonique ! L'occasion pour Photonics Bretagne de présenter ses dernières avancées technologiques en matière de fibres optiques spéciales et composants (réalisation de chapelets de réseaux de Bragg en cours de fibrage, revêtements métalliques sur fibres, câbles à fibre cœur creux anti-résonnante, ...) mais également de faire la promotion de PhotonHub Europe.
À ses côtés, au sein du Pavillon France ou en dehors, exposaient 17 de ses adhérents : Aixemtec, ALPhANOV, ALPHA-RLH, Amplitude Laser Group, BKtel photonics, CAILabs, Exail, EXFO, Irisiome Solutions, KERDRY, Laser Components, Le Verre Fluore, Leukos, Lumibird, OptoSigma, Oxxius, Thales. Une expertise française bien représentée !

Photonics PhD Days :
franc succès pour cette 2ème édition

Co-organisés par Photonics Bretagne, Anticipa, ENSSAT et Institut Foton, les Photonics PhD Days ont rassemblé pendant 2 jours à Lannion 45 participants issus de la recherche et de l'industrie, dont 25 doctorants.
Une seconde édition anglophone réussie qui a tenu toutes ses promesses : des pitchs de thèse intéressants et de nombreux posters affichés, l'inspirante et passionnante success story de Jean-François Morizur, PDG de Cailabs, un atelier de sensibilisation à l'entrepreneuriat qui a su susciter l'envie et rendre accessible la création d'entreprise innovante, et du réseautage. Des rendez-vous individuels offraient notamment l'opportunité d'échanger plus amplement avec des chefs d'entreprises (KERDRY/HEF Groupe, IDIL Fibres Optiques, Luzilight, Optosigma).
Dans le cadre du projet Photonics4Industry, Photonics Bretagne invitait également des doctorants européens à participer à cet événement. Un programme complété ainsi par des visites d'entreprises et de laboratoires de la filière photonique, fortement appréciées par l'ensemble des participants : Photonics Bretagne, KERDRY/HEF Groupe, Oxxius, Ekinops, Idil Fibres Optiques, Institut Foton, Lumibird, ainsi que les présentations des activités de Luzilight et Wainvam-e.
En bonus pour les 3 doctorants venus de Pologne, d'Autriche et de Finlande, une découverte culturelle de Lannion, de la côte de Granit Rose et de la gastronomie régionale !
Face à ce succès, une 3ème édition est d'ores et déjà prévue au 1er semestre 2024 !

Evosens miniaturise les systèmes photoniques de Deep Color Imaging et LightOn

La miniaturisation, étape-clé de l'optimisation du développement de systèmes optiques, est l'une des compétences d'Evosens. Cette expertise a permis à Deep Color Imaging d'obtenir rapidement un prototype de système d'imagerie photo-acoustique plus performant et robuste pour le domaine de l'imagerie médicale. Evosens a par ailleurs développé pour LightOn un « Optical Processing Unit » pour de l'intelligence artificielle et du calcul de grande capacité. Pour cela, Evosens a travaillé sur le cœur optique et plus particulièrement sur l'optimisation de la source, la mise en forme de faisceaux, et l'optimisation de la détection. Résultat : un volume divisé par 1000 en 9 mois.

Cailabs lève 26 M€ pour devenir leader sur le marché des stations sol-optiques

Cailabs compte désormais parmi ses investisseurs NewSpace Capital et réalise ainsi une levée de fonds de 26 millions d'euros pour soutenir l'expansion rapide de ses activités de communications laser et de stations-sol optiques. Avec leur soutien et l'appui continu de ses partenaires historiques, Cailabs ambitionne de devenir leader sur le marché des stations-sol optiques et étendre son périmètre d'offre aux liaisons navales, aéronautiques (avions drones) et terrestres.

AGENDA

- **OFC**
  5-9 mars, San-Diego (USA)
- **Assemblée Générale de Photonics Bretagne**
  16 juin 2023, Lannion
- **Laser World of Photonics**
  27-30 juin 2023, Munich (Allemagne)

Le programme de master de l'EUR NANO-PHOT

L'École Universitaire de Recherche NANO-PHOT forme, via le master et le doctorat, les chercheurs et ingénieurs de demain, capables d'exploiter et utiliser la lumière à différentes échelles. Cet article présente le programme master, entièrement enseigné en anglais au sein l'Université de Technologie de Troyes et l'Université de Reims Champagne-Ardenne.

Finalité

Le marché de l'optique et la photonique s'élève à plus de 1000 Milliards de dollars (source : Mordor Intelligence). Il concerne un grand nombre de domaines et enjeux : (télécommunication, énergie, sécurité, santé, ...) et s'accompagne d'un grand effort de recherche et d'innovation, en particulier impulsé par la nanophotonique, une branche de l'optique qui concerne l'étude et l'exploitation de la lumière à une échelle nanométrique, bien plus petite que la longueur d'onde de la lumière. NANO-PHOT recrute des étudiants en master pour les former aux sciences et technologies de la lumière à différentes échelles, incluant l'échelle nanométrique et le régime quantique.

Programme – une formation par la recherche

- **M1, semestre 1 :** Projet (1 j/s) dans un laboratoire partenaire. Optique ondulatoire, physique du solide et mathématiques/informatique.
- **M1 semestre 2 :** Interaction lumière-matière (classique et quantique), nano-optique et matériaux/systèmes optiques et optoélectroniques. Projet de recherche (1 j/s)
- **M2 semestre 1 :** Nanophotonique (interventions d'experts mondiaux), caractérisation multi échelle, nano-optique quantique. Projet de recherche (2j/s)
- Le semestre 4 se déroule au sein d'un laboratoire ou entreprise partenaire
- Langues étrangères, gestion de projet de recherche, techniques de communications, entreprenariat, propriété intellectuelle et intelligence économique.

Plus d'informations sur : https://nano-phot.utt.fr/education/master-program

Compétences et professionnalisation (exemples)

- Connaître les bases de l'interaction lumière-matière multi-échelle, incluant le domaine quantique ;
- Connaître et gérer les différents types de matériaux optiques et leurs propriétés ;
- Savoir utiliser des outils de simulation numérique, de nanocaractérisation et de nanofabrication ;
- Être autonome dans une structure de recherche et interagir avec les équipes ;
- Maitriser l'environnement économique et juridique des entreprises innovantes.

Partenariat

Un large partenariat permet aux étudiants d'interagir avec des chercheurs et industriels en France (Troyes, Reims, Paris, Saclay, Toulouse, Grenoble, Nice) ou à l'étranger (USA, UK, Canada, Allemagne, Italie, Singapour, Inde).

Accompagnement des étudiants dans leurs projets

Les étudiants bénéficient d'une écoute individuelle et d'aides financières pour les aider à concrétiser leur plan de formation et de carrière. Ces aides, cumulables avec d'autres bourses institutionnelles, peuvent s'élever à 20 k€ en fonction de la situation des étudiants : mobilité, aide ponctuelle et urgente, projet, exemption des frais de scolarité.

Témoignages d'étudiants de NANO-PHOT

https://www.youtube.com/watch?v=23e8A1UUWWA
https://www.youtube.com/watch?v=4Eld8A22g8U

Contactez-nous par e-mail : **nanophot@utt.fr**

En bref

- **NANO-PHOT a participé à deux salons :**
  I) Masters et Mastères Spécialisés, le 28 janvier, Paris Montreuil Expo,
  II) Studyrama : Masters 1 et 2, Mastères spécialisés & MBA. Espace Champerret Paris le 11 Février

- **NANO-PHOT accueille pendant 2 mois un nouveau professeur invité :**
  Professeur Nikolai GAPONIK de TU Dresden (Allemagne)

- **31 Janvier :**
  le worshop "NANO-PHOT research day" présentant le contexte recherche de l'EUR a eu lieu à Reims

- **22-23 Février :**
  NANO-PHOT a organisé à Troyes un workshop sur la nanophotonique impliquant des chercheurs de France, Espagne et USA

AGENDA

C'NANO 2023
15-17 Mars, Poitiers
NANO-PHOT sponsorise l'évènement

The International Conference on Surface Plasmon Photonics (SPP)
21-26 Mai, Houston, USA.
NANO-PHOT sera présent à cette prestigieuse conférence

Conférence MNO2023
19-21 septembre 2023, Troyes
Le premier jour sera dédié à une Summer School « Nano-Optics and Sustainability »

Incubateur Défense Optitex :

Des projets prometteurs retenus pour prototypage

Plusieurs des projets imaginés par les participants de l'incubateur ont été retenus par le comité d'évaluation d'Optitex, un incubateur de projets photonique et textile né de la collaboration entre Minalogic et Techtera, visant à accélérer l'émergence de concepts défense. Les équipes porteuses des projets disposeront d'un budget pour réaliser chacune une maquette ou un prototype de la solution imaginée, avec une restitution prévue en juin 2023. Les projets sélectionnés ont la particularité de croiser des compétences techniques maitrisées par les participants et de répondre à des problématiques évoquées par les unités de l'armée présentes lors de la 2ème journée, le 25 janvier.

Plus d'informations sur l'incubateur :
https://www.minalogic.com/lancement-du-premier-incubateur-defense-optitex/

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

GLOBAL INDUSTRIE 2023 :
NOS ADHÉRENTS EXPERTS EN VISION INDUSTRIELLE MIS À L'HONNEUR

Événement incontournable de l'industrie 4.0, Global Industrie se déroulera à Lyon du 7 au 10 mars 2023 à Eurexpo Lyon.
À cette occasion, Minalogic animera une table-ronde le 8 mars autour de la vision industrielle pour l'industrie 4.0, dans le cadre du cycle de conférences du salon. Les entreprises Teledyne e2V, Visio Shape et Expertise Vision partageront leurs derniers développements et leur vision sur ce sujet. Lynred, STMicroelectronics et Prophesee seront aussi mis à l'honneur le 8 mars dans le cadre d'une présentation par l'IRT Nanoelec de l'initiative System Lab.
Retrouvez le stand Minalogic dans le Hall 2.

Plus d'informations :
https://www.minalogic.com/minalogic-sera-present-sur-global-industrie/

Programme EASYTECH
belle moisson de projets photoniques sur la période 2020-2022

Easytech, le programme de transfert technologique de l'IRT Nanoelec, propose un accompagnement global des PME et ETI dans leur démarche d'innovation (créativité, expertise, projet R&D). Easytech est piloté par Minalogic, pôle de compétitivité de la transformation numérique, et soutenu par l'ANR et la Région Auvergne-Rhône-Alpes. De 2020 à 2022, sur les 188 projets de PME/ETI accompagnés par Easytech, 36 projets portent sur des produits ou s'appuient sur des technologies « photoniques ». Les thématiques abordées sont très vastes : de l'optique sur silicium pour détecter des gaz, de la vision industrielle intégrant de l'IA au service de l'agriculture, système d'imagerie pour satellites, capteurs photoniques quantiques pour applications médicales… Ces 36 projets représentent 2,3 M€ d'investissement dont 910 k€ de subventions.
Pour plus d'informations sur le programme, n'hésitez pas à contacter Elvir MUJIC, Directeur du Programme EASYTECH : elvir.mujic@minalogic.com.
Plus d'informations :
https://www.minalogic.com/services/monter-projet-innovant/le-programme-easytech/

AGENDA

- **Global Industrie 2023**
  du 7 au 10 mars à Lyon
- **9ème édition des Minalogic Business Meetings**
  le 30 mars 2023 à Lyon
- **Laser World of Photonics**
  du 27 au 30 juin 2023 à Munich

CONTACTEZ MOI
Florent Bouvier
Responsable
Optique Photonique
chez Minalogic
Tél : +33 (0)6 35 03 98 52
florent.bouvier@minalogic.com

Financez votre projet d'innovation avec PIMAP4Sustainability

4S Photonics for International Markets and Applications for Sustainability

Le tout nouveau projet européen PIMAP4Sustainability lance son appel à projets "Innovation" afin de soutenir les PME de la photonique, des matériaux avancés et de la fabrication avancée dans leur transition écologique et digitale, pour qu'elles deviennent plus résilientes.
Cet appel permettra de financer environ 13 projets collaboratifs entre PME européennes pour stimuler leur potentiel d'innovation dans les secteurs de l'aérospatial, de la métallurgie et de la production industrielle, grâce à des bourses pouvant atteindre jusqu'à 60 000 euros.
L'appel ouvert du 1er mars au 3 mai 2023 concerne des projets innovants avec un TRL de 5 à 8 et sur une durée de 6 à 9 mois.
PIMAP4Sustainability soutiendra en outre, par le biais d'un mécanisme supplémentaire, la formation des PME sur leur transition écologique (5 000 euros) ou leur internationalisation (10 000 euros).
Ces opportunités vous intéressent ?

Contact : Xavier Alberola
x.alberola@alpha-rlh.com

AGENDA

- **Laser World of Photonics China**
  22 au 24 mars à Shanghai
- **Les IRVE : Infrastructures de Recharge pour Véhicules Electriques**
  29 mars à Limoges
- **ViV INDUSTRY**
  4 et 5 avril à Bordeaux
- **NewSkin Days**
  25 et 26 avril à Bordeaux
- **Business Meeting « Les matériaux PAR et POUR la photonique »**
  10 mai à Paris

Tous les évènements sur
www.alpha-rlh.com

Le projet EDIH* Nouvelle-Aquitaine « DIHNAMIC » retenu par l'Europe !

Avec DIHNAMIC, la région Nouvelle-Aquitaine se dote d'un outil de soutien au développement d'une industrie numérisée, résiliente et économe en ressources dans le respect des principes éthiques.
Piloté par l'ADI Nouvelle-Aquitaine, DIHNAMIC rassemble 14 partenaires, acteurs de l'innovation, de la formation et du transfert de technologies. Sur une durée de 3 ans, il proposera aux entreprises des services destinés à favoriser l'accès à un ensemble de technologies autour de l'Intelligence Artificielle, des systèmes intelligents et de l'Internet des Objets, de la robotique, des procédés agiles et des interfaces Homme-Machine, des jumeaux numériques. L'objectif est d'accélérer et d'orienter les transitions numériques et écologiques dans l'industrie.
ALPHA-RLH est un des acteurs du projet. Léa Lemarié, Cheffe de projet européen, est en charge de la dissémination des services, du réseautage et de la mise en relation de l'écosystème d'innovation. Julie Laï-Pei, Responsable Numérique & Industrie du futur, gère l'accès aux financements.
DIHNAMIC est un projet soutenu par l'Union européenne dans le cadre du programme Digital Europe et par la Région Nouvelle-Aquitaine.
**European Digital Innovation Hub*

Contacts : l.lemarie@alpha-rlh.com - j.lai-pei@alpha-rlh.com
www.dihnamic.eu

NewSkin Days 2023

Le projet NewSkin, financé par l'Union Européenne, offre la possibilité de tester des nanotechnologies de surfaces. Le consortium organise les « NewSkin Days » qui se dérouleront les 25 et 26 avril 2023 à La Grande Poste à Bordeaux.
Cet évènement s'adresse aux PME, start-ups, acteurs industriels et laboratoires de recherche et leur permettra :

- de découvrir les 19 pilotes et laboratoires de développement et de test de nanotechnologies disponibles gratuitement *via* les Open Calls,
- d'explorer une variété de technologies permettant d'obtenir des surfaces avec des qualités uniques, telles que : la réduction de la friction, de l'usure et des vibrations ; la production en série de textures et de revêtements ; le développement et le test des membranes ; les procédés de déposition automatisés de couches minces fonctionnalisées,
- de rencontrer les partenaires de NewSkin pour discuter comment il est possible d'adapter les services du projet à leurs besoins,
- d'échanger avec des PME qui ont déjà participé aux Open Calls NewSkin dans des domaines variés comme l'aéronautique, l'automobile, le traitement de l'eau, le médical, les transports, les optiques...

Contact : Romain Hérault - r.herault@alpha-rlh.com

Salon Photonics West :
nos adhérents au rendez-vous

Le salon Photonics West s'est déroulé du 28 janvier au 2 février 2023 à San Francisco. C'est l'un des plus grands salons professionnels de la photonique au monde, avec plus de 1 100 exposants et plus de 20 000 visiteurs cette année.

Photonics France et une trentaine d'adhérents étaient sur place pour présenter leurs dernières innovations et rencontrer d'autres professionnels de l'industrie de la photonique : Alpha-RLH, Photonics Bretagne, ALPhANOV, Amplitude, AUREA Technology, CAIlabs, CEA-Leti, CEDRAT Technologies, Cristal Laser SA, Fastlite, Femto Easy, Fichou, GLOphotonics, GoyaLab, Hamamatsu, Horiba Scientific, Imagine Optic, KERDRY, Laser Components, Le Verre Fluoré, Leukos, Lumibird, MANUTECH-USD, Oxxius, Quandela, Savimex, SILINA, Symétrie, Teem Photonics, Thales LAS France.
Temps fort du salon, le CEA-Leti a tenu son workshop sur l'avenir des applications basées sur la photonique (capteurs d'images, écrans, capteurs optiques et conditionnement avancé...).
A travers Photonics West et les prochains salons internationaux, Photonics France poursuit ses efforts de valorisation de la photonique française.

VERS UN BAC PRO
POUR LA PHOTONIQUE

Depuis deux ans, Photonics France mène un projet ambitieux visant à créer un nouveau diplôme pour notre filière : le baccalauréat professionnel "optique photonique : technologies de la lumière" afin de former des opérateurs et techniciens très recherchés par nos entreprises et laboratoires. Ce baccalauréat devrait être officialisé en mars 2023. Notre filière photonique connaissant actuellement une croissance rapide et continue, les besoins en emplois, tous métiers confondus sont très importants. On estime à 4000 le nombre de postes d'opérateurs et techniciens qui seront créés chaque année.
Un groupe de travail d'enseignants et de professionnels se réunissent tous les mois depuis 18 mois pour créer ce diplôme. Les discussions et négociations sont en cours pour sa mise en place à la rentrée 2024 dans une dizaine d'académies où la photonique est déjà présente. C'est un grand pas pour répondre à un besoin crucial pour notre filière. Néanmoins, les premiers bacheliers seront diplômés en 2027, Photonics France et plusieurs partenaires préparent des formations courtes afin de former rapidement des opérateurs et techniciens déjà qualifiés ou en reconversion.

Business Meeting Télécom : inscrivez-vous sans attendre !

Photonics France organise son prochain Business Meeting : « La photonique pour les télécoms » le 21 mars 2023 à Télécom Paris (Palaiseau). Inscrivez-vous sans attendre pour choisir vos ateliers de travail (nombre de places limité).

Dans les infrastructures en fibres optiques ou en espace libre, les composants photoniques et les équipements opto-électroniques constituent l'ossature de nos réseaux de télécommunications. Passez une journée dédiée aux télécommunications optiques en compagnie des acteurs importants du domaine.

Nos Business Meetings à venir

À vos agendas ! Nos prochains Business Meetings de 2023 sont annoncés ! Outre la photonique pour les Télécoms le 21 mars (inscriptions ouvertes), deux autres rendez-vous sont annoncés. Le Business Meeting Matériaux le 10 mai à la Défense et le Business Meeting Agriculture le 14 septembre à Rennes pendant le salon SPACE.

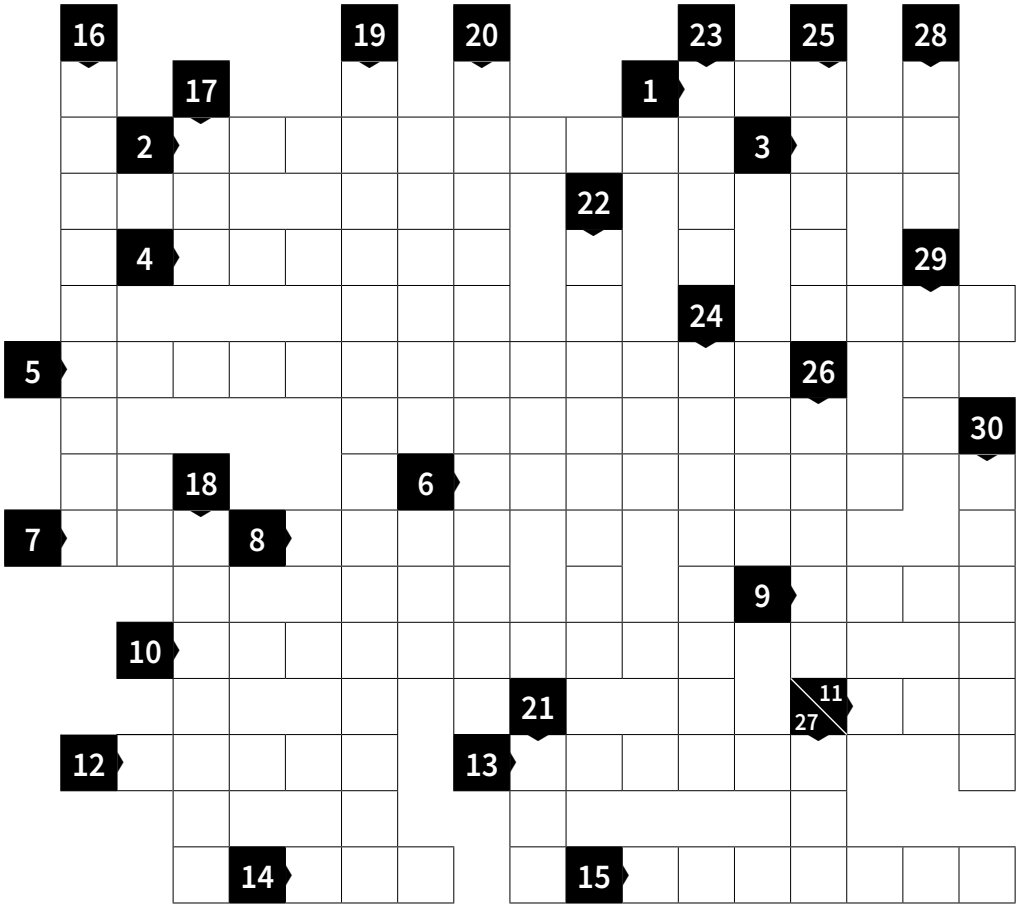
AGENDA

- **Business Meeting Télécom**
  21 mars 2023, Télécoms Paris
- **Business Meeting Matériaux**
  10 mai 2023, Saint Gobain
- **Laser World of Photonics**
  27-30 juin 2023, Munich
- **Business Meeting Agri**
  14 septembre, Rennes
- **French Photonics Days #5**
  17-18 octobre (tbc) – Strasbourg

Vous voulez sponsoriser nos évènements ? Contactez-nous !

MOTS CROISÉS
SUR LE THÈME DES LASERS DE PUISSANCE

Par Philippe ADAM



SOLUTION SUR
PHOTONIQUES.COM

1 Phosphure de germanium du zinc
2 Régime d'éclairement sans échauffement
3 Infrastructure européenne d'envergure dans le domaine des lasers de puissance
4 Prix Nobel de Physique 2018, a lancé le projet XCAN, ELI...
5 Découpe, gravure, perçage… par laser
6 On protège nos yeux pour ne pas en avoir besoin après un tir de puissance
7 Un effet à atténuer dans les lasers de puissance
8 Précurseurs d'ELI Beamlines en République Tchèque
9 Curiosity en est équipé
10 Pour une impulsion, après l'avoir étirée
11 Composant qui transforme "1 tiens" en "2 tu l'auras"
12 Centre d'Etudes Scientifiques et Techniques d'Aquitaine
13 Critère en fusion, à respecter
14 Habille la DAM !
15 Encore un laser descendu de l'Olympe
16 Ville de Californie abritant une infrastructure majeure
17 Une mission pour l'arme laser
18 Déclenche la puissance
19 Milieu actif, recalé au contrôle antidopage
20 Régime pas continu
21 En matière d'énergie, il fait Le Meilleur Job !
22 Se doivent d'être d'une très grande précision pour un multi-faisceaux
23 Éclair le plus puissant … de l'Olympe
24 Pour la lutte anti-contrefaçon, fabriquées par laser
25 Laser Petawatt en Aquitaine
26 Attention, il faut éviter ses chaleurs !
27 Étudie les excimers pour la fusion avancée
28 Installation laser du Lawrence Livermore National Lab
29 Unité mixte dans le domaine des lasers de puissance qui fait … loi
30 Énergie propre du futur ou bombe H ?

Entretien avec Sophie Brasselet

Sophie Brasselet est directrice de Recherche CNRS à l'Institut Fresnel et lauréate 2022 du grand prix Léon Brillouin de la SFO.

POUVEZ-VOUS NOUS DÉCRIRE VOTRE PARCOURS ?

A la suite de ma formation d'ingénieure à l'IOGS, j'ai effectué une thèse au CNET Bagneux (Centre national d'études des télécommunications) sous la direction de Jozeph Zyss sur les propriétés non-linéaires de molécules en solution et polymères. Dans cette thèse, je travaillais sur la diffusion harmonique non-linéaire et je cherchais à comprendre comment les structures moléculaires influent sur leurs propriétés non-linéaires du second ordre. L'environnement scientifique était très riche et permettait la rencontre d'autres domaines ; j'ai notamment travaillé avec des chimistes de synthèse qui m'ont beaucoup appris et avec qui je travaille encore. Le groupe de Joseph Zyss déménageant à l'ENS Cachan, j'y ai ensuite poursuivi mes recherches en tant qu'ATER. J'ai ensuite effectué mon post doctorat aux Etats Unis dans le groupe de William Moerner (prix Nobel de chimie 2014), tout d'abord à l'UCSD puis à Sanford, pour travailler sur l'imagerie de molécules uniques dans les cellules. J'y ai découvert le monde de la microscopie et de la biologie cellulaire, avec des questions stimulantes sur comment le comportement diffusif de protéines rapporteurs membranaires est relié à leur fonction biologique.

VOUS AVEZ TOUT D'ABORD ÉTÉ RECRUTÉE SUR UN POSTE UNIVERSITAIRE

Ayant toujours été attirée par la recherche, j'ai tout d'abord candidaté au CNRS. A ma troisième tentative, j'ai postulé en parallèle sur un poste de Maître de Conférences et j'ai eu la chance d'être recrutée à l'ENS Cachan. Même si je m'orientais au départ vers la recherche, je me suis rapidement rendue compte de la richesse du métier d'enseignant-chercheur et de son intérêt majeur pour penser les problèmes en recherche..

J'ai travaillé sur le façonnage de la matière par réorientation de molécules sous champ optique. L'objectif était de contrôler l'orientation de molécules organiques par des interactions non linéaires avec la lumière. L'ordre de la non-linéarité nous permettait de contrôler la symétrie de la distribution de molécules dans des matrices polymère. Ce sujet était très porteur pour envisager l'inscription, par la lumière, de propriétés optiques de matériaux polymères. Ce domaine, intéressant pour les composants optoélectroniques, souffrait cependant des problèmes de stabilité et de robustesse de ces matériaux qui les rendaient limités pour des applications telecoms. Ces travaux ont cependant motivé le développement d'une technique de microscopie non-linéaire qui permettait d'observer l'orientation des molécules à des échelles sub-micrométriques, outils qui me serviront beaucoup dans la suite de mes recherches en imagerie pour le vivant. Cet intérêt pour l'imagerie pour le vivant, né pendant mon séjour postdoctoral, m'a poussée à rejoindre une équipe dédiée à ce sujet de l'imagerie pour la biologie : l'équipe MOSAIC à l'Institut Fresnel. Suite à une demande de mobilité j'ai pu été recrutée sur un autre poste MCF à Marseille où j'ai rejoint l'Institut Fresnel en 2007, enseignant à l'université Paul Cezanne (aujourd'hui Aix Marseille Université, AMU).

PUIS VOUS AVEZ RAPIDEMENT POSTULÉ SUR UN POSTE CNRS

Après 7 années en enseignement et recherche, je souhaitais me lancer pleinement dans un nouveau projet qui portait sur le façonnage en polarisation d'impulsions femtosecondes. L'idée était d'encoder des états de polarisations variés dans le spectre complexe d'une impulsion femtoseconde, par mise en forme d'impulsions en phase et en polarisation *via* des modulateurs spatiaux de lumière. Etudier, dans le domaine vectoriel, comment une telle impulsion interagit avec la matière était nouveau et a été décliné en parallèle, par d'autres groupes, dans les milieux plasmoniques : par le jeu de mélange de fréquences non-linéaires en interaction avec les résonances moléculaires, j'ai pu utiliser cette méthode pour analyser *via* une seule impulsion, les réponses de polarisation de génération de second harmonique de milieux organisés comme le collagène dans les tissus biologiques.

Ces travaux ont cependant motivé le développement d'une technique de microscopie non-linéaire qui permettait d'observer l'orientation des molécules à des échelles sub-micrométriques, outils qui me serviront beaucoup dans la suite de mes recherches en imagerie pour le vivant. Cet intérêt pour l'imagerie pour le vivant, né pendant mon séjour postdoctoral, m'a poussée à rejoindre une équipe dédiée à ce sujet de l'imagerie pour la biologie : l'équipe MOSAIC à l'Institut Fresnel.

Deux axes de recherche se dégagent. Le premier axe, pour la biologie, vise à imager l'orientation et l'organisation des molécules et à l'associer à une fonction biologique, comme le changement conformationel de protéines qui est très difficilement mesurable en cellule vivante et à haute dynamique spatio-temporelle. Le second axe, plus physique, vise à mesurer expérimentalement des champs optiques en 3D en super-résolution.

COMMENT AVEZ-VOUS RÉALISÉ QUE CES APPROCHES POUVAIENT ÊTRE IMPORTANTES POUR IMAGER LE VIVANT ?

Pendant mon séjour post-doctoral chez W. Moerner, j'ai pu apprécier les défis et questions importantes dans ce domaine. J'avais notamment participé aux premières expériences de suivi de la diffusion latérale de molécules uniques dans des membranes cellulaires pour analyser les propriétés des environnements lipidiques sur le confinement de protéines réceptrices. Ces protéines peuvent former des organisations bien précises qui régissent les fonctions biologiques : je souhaitais donc associer les thèmes sur lesquels j'avais eu l'opportunité de travailler - microscopie, optique non-linéaire, sensibilité à la polarisation– pour développer une approche novatrice pour imager l'organisation du vivant. Il fallait tout développer, à la fois les outils d'instrumentation optique et les formalismes qui permettaient d'interpréter les données. Progressivement, je suis revenue aux molécules uniques pour répondre à la question de l'échelle moléculaire de ces organisations. J'avais acquis le savoir-faire de l'imagerie des molécules uniques par fluorescence lors de mon post-doc à Stanford, et se développait en parallèle un axe innovant pour gagner en résolution spatiale à partir de la localisation spatiale de ces molécules uniques : l'imagerie par localisation d'émetteurs isolés (qui a également été l'objet du prix Nobel 2014 à Eric Betzig) J'ai donc commencé les premières expériences d'imagerie de localisation et d'orientation de molécules uniques par microscopie polarisée vers 2010. Les progrès très rapides développés en imagerie super résolue, notamment les progrès computationnels pour traiter ces images, m'ont permis de développer, par le contrôle de la polarisation, une imagerie super résolue d'organisation des de molécules uniques. Ce domaine se développe rapidement au laboratoire, et ouvre même à l'ingénierie de nouvelles sondes fluorescentes, grâce à une collaboration très riche avec Manos Mavrakis, biologiste à l'institut Fresnel intéressé par l'organisation des filaments du cytosquelette. En parallèle, nous avons travaillé avec Hervé Rigneault, Patrick Ferrand et Julien Duboisset sur le déploiement de l'imagerie polarisée pour la fluorescence multi-photonique et le Raman cohérent, méthodes qui sont aujourd'hui déployées comme des diagnostiques possibles de pathologies dans les tissus biologiques.

QUELS SONT VOS AXES DE RECHERCHE ACTUELLEMENT ?

Je cherche à étudier et contrôler la polarisation dans des conditions non paraxiales, conditions pour lesquelles la composante axiale (ou longitudinale) de la polarisation est importante. Je collabore sur ces questions avec un spécialiste de la polarisation, Miguel Alonso, qui a rejoint il y a quelques années le laboratoire. Nous travaillons ensemble sur la mise en forme en phase et en polarisation de faisceaux focalisés pour répondre à aux questions de la métrologie d'un état de polarisation 3D pour un faisceau focalisé et des formalismes appropriés pour les états de polarisation 3D partiellement polarisés. Les outils expérimentaux que nous développons sont importants pour les physiciens qui travaillent sur ces questions dans des domaines très larges, qui peuvent toucher la théorie, les applications en nanophotonique, l'imagerie... Ce qui m'intéresse c'est de tirer profit de ces expériences pour mesurer des orientations moléculaires 3D (ce qui n'est pas vraiment accessible aujourd'hui) et diagnostiquer des champs optiques 3D structurés sous la taille de la résolution optique.

Deux axes de recherche se dégagent. Le premier axe, pour la biologie, vise à imager l'orientation et l'organisation des molécules et à l'associer à une fonction biologique, comme le changement conformationel de protéines qui est très difficilement mesurable en cellule vivante et à haute dynamique spatio-temporelle.

Le second axe, plus physique, vise à mesurer expérimentalement des champs optiques en 3D en super-résolution. Miguel Alonso développe par exemple un concept de skyrmions optiques, structures du champ périodiques parcourant spatialement toute la sphère de Poincaré 3D. Pour sonder ces skyrmions, des nanosondes de champs 3D sont nécessaires : ce sont des nanoparticules métalliques qui se comportent comme des dipôles diffusants et nous informent en champ lointain, *via* des méthodes proches de celles développées en molécules uniques, de l'état de polarisation 3D localisé.

CES TRAVAUX VOUS AMÈNENT À COLLABORER AVEC D'AUTRES DISCIPLINES

Mes champs de recherches sont très riches en collaborations, notamment avec les chimistes et biologistes qui s'intéressent à la manière dont les molécules s'orientent et s'organisent. Les domaines touchés en biologie sont nombreux, en biologie du développement, neuroscience, immunologie.... Les liens avec les physiciens sont nombreux : j'ai mentionné le domaine de l'optique mathématique avec Miguel Alonso mais j'ai également pu collaborer sur un beau sujet avec Sylvain Gigan, où se posait la question du maintien de polarisation lorsque les fronts ondes sont remis en forme pour focaliser un faisceau derrière un milieux diffusant. Ce domaine est d'intérêt pour l'imagerie non-linéaire polarisée dans les tissus, qui à grande profondeur perturbent les champs de manière aléatoire pour former un speckle. La polarisation est une signature importante de cette

perturbation, et de la nature du contrôle cohérent des champs dans un milieu diffusant. Aujourd'hui nous cherchons à maitriser les fronts d'onde, non seulement en phase, mais aussi en polarisation, pour corriger les distorsions subies par le front d'onde dans des tissus biologiques. Nous cherchons notamment à appliquer le formalisme matriciel développé pour l'optimisation de front d'ondes en transmission, en imagerie non-linéaire polarisée.

VOUS AVEZ MONTÉ L'UNE DES PREMIÈRES FORMATIONS ERASMUS MUNDUS EN FRANCE EN PHOTONIQUE

Oui, lorsque je suis rentrée au CNRS, j'avais gardé une sensibilité à l'enseignement et aux programmes internationaux, et je venais d'un laboratoire qui avait obtenu à l'initiative de Joseph Zyss et Isabelle Ledoux un Erasmus Mundus (MONABIPHOT) autour de l'optique moléculaire, regroupant des compétences en chimie, la biologie et la photonique. Avec des collègues de Marseille, notamment Hugues Giovannini, nous avions senti le besoin de structurer la photonique du site de Marseille autour d'une formation s'appuyant sur les laboratoires concernés comme le PIIM, le LAM et le LP3. Nous avons ainsi monté la formation Erasmus Mundus EUROPHOTONICS en 2011, en partenariat avec trois autres villes, Karlsruhe, Barcelone et Florence. Nous avons obtenu en parallèle du projet de master, le financement du programme doctoral Erasmus Mundus du même nom. Une petite équipe dévouée s'est formée et a permis de faire tourner cette formation originale qui a pris par la suite de l'ampleur. Le programme doctoral a duré 5 ans, et le programme master s'est élargi avec des partenaires supplémentaires comme Tampere, Vilnius, Rochester, Sydney, Mexico... Nous avons été chanceux d'obtenir ces deux financements européens puis les suivants pour le Master, je suis fière de la réussite de ce programme.

VOUS AVEZ ÉGALEMENT OBTENU UN EQUIPEX SUR L'IMAGERIE ET LA DÉTECTION COMPUTATIONNELLE

C'est une action que j'ai souhaité mener lors de mon démarrage en tant que directrice de l'Institut Fresnel. Ce projet obtenu en 2021, qui finance des équipements d'imagerie et de détection dans lesquels les aspects computationnels (optimisation, inversion, compression de données,….) sont intégrés à part entière, est un bel exemple de l'identité du laboratoire. Les personnes impliquées sont des physiciens des ondes, mais également des théoriciens et informaticiens. Cette hybridation, propre à ce laboratoire mais qui se retrouve aussi dans quelques autres en France, est une grande richesse pour inventer les concepts et outils de demain dans de nombreux domaines. Ce qui me motive aujourd'hui dans la fonction de direction d'unité est d'accompagner la création de ces projets horizontaux, liant les savoir-faire des personnels du laboratoire, et structurant la recherche autour de thèmes dans lesquels la diversité des domaines est importante.

QUELLES SONT LES CLÉS POUR QUE LA PHOTONIQUE POURSUIVE SON DÉVELOPPEMENT ?

L'avenir de la photonique sera lié à notre capacité à maintenir des actions de structuration entre les personnes impliquées. En ce sens, la SFO a un rôle majeur à jouer, c'est un substrat essentiel. On le constate dans les congrès de la SFO : il existe une vraie communauté scientifique en France autour de l'optique, qui évolue avec des personnes inventives, dynamiques et un réel enthousiasme. Cette communauté doit également rester à l'affut des développements divers et dans la curiosité des communautés qui l'entourent : non seulement en physique mais dans les disciplines voisines proches (chimie, biologie) et éloignées (écologie, sciences humaines).

TÉMOIGNAGE D'ENTREPRENEUR
Denis Barbier

Denis Barbier est le PDG et cofondateur de Microlight 3D, entreprise développant des imprimantes 2D et 3D basées sur l'absorption à 2 photons.

VOTRE PARCOURS S'EST SITUÉ À LA FRONTIÈRE ENTRE ENTREPRISE ET RECHERCHE ACADÉMIQUE

Oui. Lorsque j'ai été diplômé de l'école d'ingénieur à Grenoble, j'ai souhaité poursuivre en thèse au CEA LETI puis un post-doctorat à l'Imperial College à Londres. Malgré ce parcours académique, j'avais en moi le désir d'entreprendre. J'ai donc saisi l'opportunité de revenir sur Grenoble en rejoignant le GEEO, un organisme privé/public cofinancé par 3 partenaires : Grenoble INP, Schneider Electric et Radiall. Notre rôle était d'identifier dans les labos de G-INP des innovations dans le domaine de la photonique, de les amener à maturité, puis de les transférer dans les entreprises Schneider Electric et Radiall. Ce poste était très intéressant et correspondait à mes attentes car il faisait le lien entre la recherche académique et les entreprises.

VOUS AVEZ ENSUITE CRÉÉ TEEM PHOTONICS

Nous avons créé, avec Antoine Kévorkian, Teem Photonics en 1998, une société spécialisée dans la production de composants pour les réseaux de télécommunication par fibre, tels que des diviseurs (1xN) pour le déploiement de la fibre chez l'abonné, et des amplificateurs guide d'onde sur verre dopé erbium. L'explosion de la bulle télécom en 2002, nous a obligés à revendre l'activité diviseurs à l'entreprise américaine Gould Fiber Optics, puis a réorienter nos activités vers la production de lasers. Ce qui nous a amenés à racheter en 2005 une filiale grenobloise du groupe JDSU. Teem Photonics existe toujours aujourd'hui avec une très belle réputation dans le domaine des lasers nanosecondes.

COMMENT AVEZ-VOUS DÉCOUVERT CETTE TECHNOLOGIE D'IMPRESSION 3D PAR PROCÉDÉ PHOTONIQUE ?

Des chercheurs du LIPhY /UGA (Patrice Baldec et Michel Bouriau), utilisateurs des lasers de Teem Photonics, sont venus nous présenter une technologie d'impression basée sur l'absorption à 2 photons capable de polymériser des polymères à des échelles sub-microniques. Plusieurs brevets ont été déposés, appartenant à l'UGA. Cette technologie nous a séduits par sa versatilité : l'on peut créer des formes 3D en déplaçant un laser tout en bénéficiant de la résolution sub-micrométrique grâce à l'absorption à 2 photons. A l'époque, seule l'entreprise Nanoscribe commercialisait des instruments sur cette approche. A ce jour, nous sommes les 2 principaux acteurs dans ce domaine. Les premières publications des chercheurs du LIPhY datent de 2002. Le début de la maturation a été faite au sein de Teem Photonics, mais TP produisant des composants et des lasers, n'a pas souhaité aller plus loin dans le développement de cette innovation nécessitant des compétences systèmes.

C'EST LA RAISON POUR LAQUELLE VOUS AVEZ CRÉÉ MICROLIGHT 3D

Il a en effet fallu créer une entreprise dédiée. J'ai quitté Teem Photonics en 2015 pour préparer la création, puis Michel a quitté le Liphy pour que l'on cofonde Microlight 3D en 2016.

LA SATT A JOUÉ UN RÔLE DÉTERMINANT DANS LA CRÉATION DE MICROLIGHT 3D.

Oui…3 phases : maturation, incubation et accélération. La SATT Linksium *via* la maturation, a financé le laboratoire pour aller sur un proto montrable au clients. Pendant la phase d'incubation nous avons obtenu une licence exclusive et transféré brevets et savoir-faire de l'UGA vers l'entreprise, pour aboutir à la création de Microlight3D fin 2016.

MICROLIGHT3D RENTRE AUJOURD'HUI DANS SA 6ÈME ANNÉE

Microlight n'est plus une start-up mais une entreprise deep-tech composée aujourd'hui d'une vingtaine de salariés. La moitié fait de la R&D, pour améliorer les systèmes existants et en créer de nouveaux. L'autre moitié travaille dans le commerce et la production. Nous concevons toutes les pièces hardwares que l'on fait réaliser par des fabricants spécialisés. Le software est entièrement maitrisé en interne. Nous assemblons tous les éléments, nous calibrons la machine et l'envoyons chez le client.

Plusieurs brevets ont été déposés, appartenant à l'UGA. Cette technologie nous a séduits par sa versatilité : l'on peut créer des formes 3D en déplaçant un laser tout en bénéficiant de la résolution sub-micrométrique grâce à l'absorption à 2 photons.

Nous utilisons un laser à 532 nm en régime sub-nanoseconde car cette longueur d'onde s'accorde bien avec la plupart des polymères. Des machines utilisent cependant d'autres longueurs d'onde. Un monofaisceau est concentré temporellement et spatialement. Le faisceau est focalisé et l'absorption se produit dans le point focal. Le faisceau est déplacé avec des moteurs piezo-électriques

COMMENT SE RÉPARTIT VOTRE CHIFFRE D'AFFAIRES ?

75% de notre chiffre d'affaires est réalisé à l'export. Nous avons des distributeurs en Asie, et des agents en Amérique du Nord, pour l'Europe nous travaillons en direct. Notre chiffre d'affaires se répartit de la façon suivante 1/3 Asie, 1/3 Europe et 1/3 Amérique du Nord. En 2022, nous avons observé une accélération des ventes en Chine.

COMMENT SE COMPOSE VOTRE GAMME DE PRODUITS ET QUI SONT VOS PRINCIPAUX CLIENTS ?

Nous avons 2 familles de produits : SmartPrint.UV, une imprimante 2D, et Microfab-3D que l'on décline en 3 niveaux de performances. Nos principaux clients sont des laboratoires de recherche publics ou privés.

POUVEZ-VOUS NOUS DÉCRIRE LE PROCÉDÉ PHOTONIQUE À LA BASE DE VOTRE TECHNOLOGIE D'IMPRESSION ?

Nous utilisons un laser à 532 nm en régime sub-nanoseconde car cette longueur d'onde s'accorde bien avec la plupart des polymères. Des machines utilisent cependant d'autres longueurs d'onde. Un monofaisceau est concentré temporellement et spatialement. Le faisceau est focalisé et l'absorption se produit dans le point focal. Le faisceau est déplacé avec des moteurs piezo-électriques.

SI LA PHOTONIQUE EST AU CŒUR DE VOTRE SAVOIR-FAIRE, LES MARCHÉS APPLICATIFS SEMBLENT BIEN PLUS VASTES.

Actuellement, le seul marché applicatif en photonique est dans la micro-optique, comme par exemple la réalisation de micro-lentilles en bout de fibre optique. On imprime directement les lentilles/prismes en bout de fibre optique après clivage ou polissage. Les autres marchés applicatifs vont de la microfluidique-on ne fabrique pas les canaux mais les objets qui vont dans les canaux pour améliorer les performances des puces microfluidiques-à la Microrobotique - pièces articulées les unes par rapport à d'autres – à la biologie cellulaire car nous pouvons imprimer directement sur des matériaux biologiques comme le collagène sur lesquels il est possible de faire croitre des cellules, aux dispositifs médicaux : matrice de micro-aiguilles, ou encore les métamatériaux.

OÙ SE CONCENTRENT VOS EFFORTS EN RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT ?

L'Amélioration des performances passe par un gain de temps. Nous travaillons sur la source laser, le polymère et le logiciel le déplacement du faisceau pour imprimer plus rapidement.

MAINTENEZ–VOUS DES LIENS AVEC LE MONDE ACADÉMIQUE POUR AMÉLIORER VOTRE TECHNOLOGIE ?

Oui avec des laboratoires académiques, sous la forme de projets collaboratifs financés par les guichets ANR, PSPC, R&D Booster, européens.

2BLighting Technologies
Solutions de soudure optique pour le marché de la Photonique

Nouvelle plateforme de fusion par laser CO2 LZM125A+ Fujikura
Soudure de 80 à 2.5mm de silice
Tous types de fibres (LDF, PM, PCF, Zblan,...)
Ablation, clivage et mode-stripping
Tapers, ball lenses, fonctions spéciales

Soudeuse FSM100P+ Fujikura
Soudure de 60 à 1.2mm de silice
Mode PM avec End-View
Fonctions spéciales intégrées
Pilotable par PC via logiciel convivial

Nouveau cliveur CT106+ Fujikura
Clive les fibres de 60µm à 1.2mm
Option clivage angulaire réglable 0-15°
Back-stop intégré
Clamps de fibres motorisés et automatiques

www.2blighting.fr
info@2blighting.com
+33 1 64 59 21 30

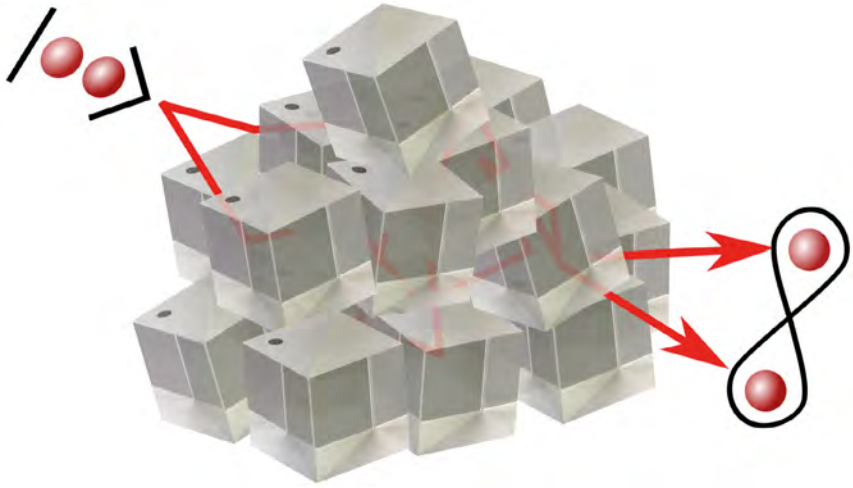
Préserver l'intrication quantique de la diffusion

L'intrication quantique est une propriété fascinante de la nature qui maintient un lien étroit entre deux particules quelle que soit la distance qui les sépare. Elle sera sans nul doute à la base de nombreuses technologies de demain. Cependant, l'intrication est une propriété fragile et très sensible à son environnement.

L'intrication quantique est une propriété fascinante de la nature qui maintient un lien étroit entre deux particules quelle que soit la distance qui les sépare. Elle sera sans nul doute à la base de nombreuses technologies de demain. Cependant, l'intrication est une propriété fragile et très sensible à son environnement. En optique, elle est particulièrement affectée par le phénomène de diffusion. Par exemple, lorsque des paires de photons intriqués se propagent dans un milieu diffusant, comme un tissu biologique ou une couche d'atmosphère turbulente, les photons sont déviés de manière aléatoire dans toutes les directions. Ces multiples déviations détériorent l'intrication qui lie les photons, la rendant inutilisable en pratique.

Dans un nouvel article publié dans *Physical Review X Quantum* [1], des physiciens de l'Institut des nanosciences de Paris, du laboratoire Kastler-Brossel et de l'université de Glasgow ont utilisé le façonnage de front d'onde optique pour manipuler des paires de photons et restaurer l'intrication après propagation dans un milieu diffusant.

Pour cela, ils ont conçu une expérience dans laquelle des paires de photons intriqués sont produites à l'aide d'un cristal non linéaire et d'une diode laser bleu. Elles sont ensuite envoyées vers une couche de Parafilm jouant le rôle de milieu diffusant. Après propagation, les photons transmis sont détectés par une caméra ultra-sensible et un algorithme de traitement d'image permet de mesurer l'intrication. À cause de la diffusion, les chercheurs ont constaté que l'intrication quantique devenait indétectable en sortie. En effet, les deux photons d'une même paire se séparent et se propagent dans des directions aléatoires à cause des inhomogénéités du milieu. Ils perdent alors leurs corrélations spatiales, dont la mesure sert à déceler expérimentalement la présence d'intrication.



Vue artistique de paires de photons intriqués se propageant dans un milieu diffusant. Les cubes séparateurs de lumières entassés aléatoirement représentent les inhomogénéités d'un milieu diffusant. Malgré le mélange, l'intrication entre les paires reste présente en sortie et peut être rendue détectable par du façonnage de front d'onde.

Cependant, détecter des corrélations spatiales est une condition suffisante mais non nécessaire pour certifier la présence de l'intrication. En effet, le milieu étant statique et linéaire, l'intrication est toujours bien présente en sortie, mais est devenue indétectable. Elle a été 'mélangée' par un processus complexe mais déterministe d'interférences d'onde à deux photons.

Étonnamment, des phénomènes ondulatoires similaires se produisent dans le monde classique. Par exemple, lorsque la lumière laser, dite cohérente, rencontre un milieu diffusant, elle produit en sortie une figure de 'speckle' qui présente des grains sombres et brillants distribués aléatoirement. Cette figure résulte aussi d'un 'mélange' d'ondes diffusées qui interfèrent de manière complexe. Au cours des vingt dernières années, des méthodes de façonnage de front d'ondes optiques ont été dévelopées pour corriger ces interférences en agissant sur l'onde incidente du milieu [2,3]. Elles ont notamment été utilisées en microscopie pour imager en profondeur dans les tissus biologiques.

Dans leur expérience, les physiciens ont adapté ces méthodes de contrôle d'onde aux sources de paires de photons intriqués. Ils ont ainsi pu façonner les corrélations quantiques entre les paires avant qu'elles n'entrent dans le milieu pour compenser exactement la perte des corrélations induite par la diffusion. En restaurant les corrélations à la sortie, ils rendent détectable de nouveau l'intrication quantique, ce qui préserve son potentiel d'utilisation. De plus, cette étude a aussi montré que la dimension de l'intrication, qui est une propriété spécifique des états quantiques intriqués en 'haute dimension' comme ceux de l'expérience, était en partie préservée.

Cette approche peut s'avérer très utile pour développer des dispositifs d'imagerie et de communication quantiques, notamment ceux exploitant des états quantiques intriqués en haute dimension. En effet, parce qu'ils ne sont jamais parfaits, la présence inévitable de diffusion et d'aberrations dans les systèmes optiques tend à dégrader la qualité de l'intrication. C'est actuellement l'un des obstacles au développement industriel de certaines technologies quantiques photoniques. En préservant les corrélations spatiales beaucoup plus efficacement, on peut alors améliorer substantiellement les performances de ces systèmes et faire un pas vers leur exploitation technologique. ●

RÉFÉRENCES

[1] B. Courme, P. Cameron, D. Faccio, S. Gigan, H. Defienne, "Manipulation and certification of high-dimensional entanglement through a scattering medium," Phys. Rev. X Quantum **4**, 010308 (2023).
doi: 10.1103/PRXQuantum.4.010308
Open article : arXiv
[2] I. M. Vellekoop, A. P. Mosk, "Focusing coherent light through opaque strongly scattering media," Opt. Letters **32**, 2309 (2007).
[3] S. M. Popoff, G. Lerosey, R. Carminati et al., "Measuring the transmission matrix in optics: an approach to the study and control of light propagation in disordered media," Phys. Rev. Lett. **104**, 100601 (2010).

Dévier la foudre à l'aide d'un laser intense

Incendies de forêt, coupures de courant, dommages aux installations : la foudre fascine mais s'avère destructrice. Elle provoque jusqu'à 24 000 décès par an dans le monde et cause de nombreux dégâts.

À ce jour, le paratonnerre inventé par Benjamin Franklin demeure le meilleur moyen de s'en prémunir, mais son rayon d'action reste limité. Pour y remédier, un consortium européen piloté par le Laboratoire d'Optique Appliquée (CNRS) et l'Université de Genève- en partenariat étroit avec l'EPFL, TRUMPF Scientific lasers, ArianeGroup, la société AMC (Pr. A. Mysyrowicz) et la Haute école d'ingénierie du canton de Vaud (HEIG-VD) - travaille sur un système de paratonnerre laser baptisé «Laser Lightning Rod».

Le projet «LLR» a commencé par le développement par TRUMPF scientific lasers d'un laser ultracourt d'une puissance moyenne d'un kilowatt. Ce laser délivre des impulsions de durée picoseconde de près d'un Joule d'énergie à une cadence de 1 kHz et à une longueur d'onde de 10^{30} nm. Il a été installé en 2021 au sommet du Mont Säntis (Suisse, 2502 m), près d'une tour émettrice de Swisscom. Ce site, qui est l'une des structures les plus foudroyées d'Europe, a été instrumenté par l'EPFL pour l'observation de la foudre. En générant des filaments de plasma au-dessus de la tour, le laser a permis de guider la foudre le long de son faisceau sur une longueur de plus de 50 mètres. Ce résultat a été vérifié en plusieurs occurrences et avec divers diagnostiques.

Pointé dans le prolongement d'un paratonnerre traditionnel, ce système pourrait ainsi en augmenter virtuellement la hauteur et de fait la surface de la zone qu'il protège. Il permettrait ainsi de protéger de larges infrastructures telles que des aéroports ou des centrales électriques. ●

RÉFÉRENCE

A. Houard, P. Walch, T. Produit *et al.* "Laser-guided lightning," Nat. Photon. (2023).
https://doi.org/10.1038/s41566-022-01139-z

La SFO a quarante ans

Pierre CHAVEL[1,*], Benoît BOULANGER[2]

[1] Université Jean-Monnet de Saint-Etienne, CNRS, Laboratoire Hubert Curien, Institut d'Optique, Saint-Etienne, France
[2] Université Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, Institut Néel, Grenoble, France
***pierre.chavel@institutoptique.fr**

La SFO est entrée dans sa quarantième année. Après une évocation des circonstances de sa fondation, nous mettons en évidence les caractéristiques et les activités qui permettent d'affirmer que notre société a réussi à créer une communauté scientifique vivante et en bonne interaction avec ses environnements tant scientifique que géographique.

https://doi.org/10.1051/photon/202311822

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 statuts de la Société française d'optique ont été déposés fin 1983 à la sous-préfecture de Palaiseau, officialisant la volonté de ses fondateurs de constituer en France une communauté de la recherche en optique. Une « société savante » telle que la SFO doit donner à ses membres l'occasion de dialogues et de partenariats nouveaux, leur permettre de rayonner en tant que communauté, et cependant éviter le morcellement aussi bien que l'isolement : considérons ces quarante ans d'histoire sous ces angles.

Fondation et mise en place

À l'occasion du 25e anniversaire de la SFO, son fondateur et premier président, Jean Bulabois, a expliqué dans ces colonnes [1] qu'en 1983 la situation était mûre pour créer une nouvelle société savante au profit de la communauté de l'optique en France et contribuer ainsi à son épanouissement : le laser et la fibre optique révolutionnaient le domaine, apportant à de nombreux chercheurs dans des secteurs scientifiques variés des outils à prendre en main puis à mettre en œuvre, alors que le secteur économique voyait s'ouvrir, entre autres, l'usinage par laser, de nouvelles méthodes de métrologie, sans oublier le champ immense des télécommunications optiques. Le congrès « Horizons de l'optique » venait de naître comme spontanément, en même temps que les Journées nationales d'optique guidée (JNOG) et l'exposition « Opto ».

Le Comité français d'optique, groupe de travail coopté chargé depuis 1947 de représenter la France auprès de la Commission internationale d'optique (CIO), a bien constaté qu'il n'avait ni l'envergure ni la représentativité voulues pour animer et coordonner une communauté nouvelle : cette tâche revenait à une société à laquelle pourrait adhérer toute personne active en optique dans la recherche et ses applications : la Société française d'optique, dont les statuts ont englobé les liens avec la CIO mais permettaient d'emblée d'aller bien plus loin.

En moins de dix ans, l'effectif de la SFO avait dépassé 500 membres et présentait une caractéristique remarquable, appropriée au domaine de l'optique : le secteur industriel représentait 40% de l'effectif, à parité avec les laboratoires universitaires (CNRS inclus), les autres 20% correspondant aux autres organismes publics (CEA, CNES, ONERA, DGA, ...). Horizons de l'optique et les JNOG étaient devenus des rendez-vous traditionnels, auxquels s'ajoutait COLOQ, le Colloque sur les lasers et l'optique quantique ; la SFO avait organisé une demi-douzaine de conférences internationales, initié sa série d'écoles thématiques et créé ses premiers « clubs » qui offraient à de petites communautés dynamiques le cadre souple propice à leur déploiement. Peu après est né Optique et photonique, le premier magazine de la SFO, auquel devait succéder en 2001 la revue Photoniques, publication fort prisée dont vous êtes en train de lire la 118e livraison bimestrielle.

Figure 1 : (En haut à gauche) Premier logo de la SFO ; (En bas à gauche) Photographie du fondateur et premier président de la SFO, Jean Bulabois ; (A droite) Couverture du recueil du colloque Horizons de 1985 à Besançon.

organisée pour laisser aux sociétés nationales d'optique toute leur place. Pour mettre en évidence la pérennité de leur lien à l'EOS, depuis 2003, la SFO et huit autres sociétés sœurs en ont le statut de « branche » nationale.

Ces frontières sont également thématiques. L'optique, en tant que science, étant sans contestation possible une branche de la physique, avait sa place au sein de la Société française de physique (SFP) depuis la création de cette dernière, 110 ans avant celle de la SFO. En 1983, c'est surtout au sein de la division de physique atomique et moléculaire de la SFP qu'elle trouvait sa place ; il s'est alors établi une certaine complémentarité entre les thèmes traités au sein de cette division et la SFO. Rapidement, de nombreux chercheurs membres de la SFP le sont restés tout en adhérant à la ●●●

Les partenariats de la SFO

Créer une communauté, lui donner corps et visibilité, ne peut se faire sans établir des frontières tout autour. Tout l'art d'une opération bien menée consiste à les ouvrir au moment même de leur création. S'insérant d'emblée dans la famille des sociétés savantes d'optique par son appartenance à la CIO, la SFO a dès le début tissé des liens avec ses voisines : le premier « Horizons de l'optique » après sa fondation s'est tenu à Besançon au printemps 1985 en conjonction avec la réunion annuelle de la Deutsche Gesellschaft für angewandte Optik. En mars 1992, elle faisait partie des membres fondateurs de l'European Optical Society (EOS), acteur légitime sur le terrain des colloques internationaux sur le sol européen, en dialogue et en partenariat avec les autres sociétés savantes d'optique au champ d'action international : tout en admettant des membres individuels, l'EOS est

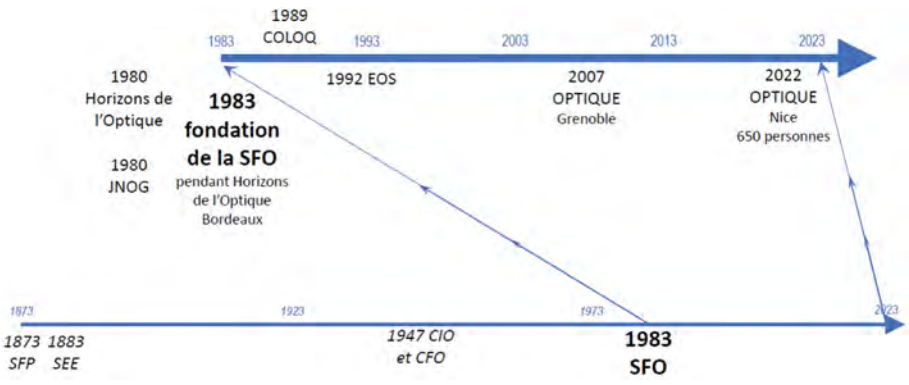


Figure 2 : Flèche chronologique avec les dates clés de l'histoire de la SFO, notamment les premières conférences Horizons de l'Optique et JNOG organisées en 1980, puis la fondation de la SFO en 1983 à l'occasion de la conférence Horizons à Bordeaux et quelques initiatives marquantes qui ont fait suite.

SFO, puis la possibilité de cotisations jumelées leur a été proposée. La Société des électriciens et électroniciens (SEE), datant de 1883, est dans le même cas de société savante dédiée à une branche de la physique tout en affirmant sa personnalité propre. Les premiers clubs communs entre SFO et SEE remontent aux origines de la SFO. Avec la Société française du vide, SFO, SFP et SEE ont constitué la « Fédération française des sociétés scientifiques ».

On peut enfin parler de relations entre organisations professionnelles. Le dialogue entre la SFO et la fédération industrielle Photonics France (construite sur la base d'organisations antérieures, dont le Syndicat général de l'Optique et des Instruments de Précision, SGOIP, qui était actif en 1983) a toujours existé, et des industriels actifs dans cette fédération ont fréquemment siégé au conseil de la SFO.

La SFO à quarante ans

Notre SFO souffle ses 40 bougies cette année ! Elle est en pleine forme, avec près de 900 adhérents académiques et industriels et une palette d'outils performants qui lui permettent d'animer la très active communauté française de l'optique dans toutes ses tonalités qui vont du fondamental aux applications. Il y a tout d'abord ses 16 clubs, qui couvrent tous les grands domaines de la photonique, et ses 3 commissions (enseignement, réussir la parité en optique, optique sans frontière) qui sont autant de racines pour notre société savante. Ces entités avaient, et ont toujours, pour tradition d'organiser des événements spécifiques, mais en 2007, il nous a semblé important de créer un événement commun permettant à toutes ces composantes de se retrouver, d'échanger, de faire véritablement corps. Le challenge était de taille, mais le succès le fut tout autant, avec plus de 500 participants à OPTIQUE Grenoble 2007. Ce fut le premier congrès OPTIQUE de la SFO, qui s'est ensuite tenu avec une audience aussi soutenue à Lille, Marseille, Paris, Rennes, Bordeaux, Toulouse, Dijon, Nice, la prochaine ville étant Rouen en 2024. Là aussi, le rôle de « go between » entre fondamental et applications joue à plein, avec la tenue d'expositions industrielles de plus de 40 stands. Lors de ces événements nationaux sont également remis le Grand Prix Léon Brillouin, le Prix Fabry – de Gramont et le Prix Arnulf – Françon qui, à chaque fois, nous montrent combien notre communauté est talentueuse. Les écoles thématiques organisées par la SFO, aujourd'hui en plein essor, sont d'efficaces vecteurs de rayonnement de notre société savante à l'adresse des doctorants et jeunes chercheurs. Quand il s'agit de rayonnement de la SFO, comment ne pas parler aussi de la revue Photoniques, qui est à la hauteur des meilleurs magazines mondiaux dans sa catégorie, alliant une forte pédagogie à une grande acuité en matière d'actualités scientifiques et industrielles, agrémentées d'une très bonne couverture régionale. Ajoutons aussi que la SFO est toujours active au sein de la communauté internationale, avec l'organisation du congrès EOSAM de l'EOS à Dijon cette année et la co-organisation avec la représentation territoriale de l'Afrique de l'Ouest du congrès triennal de la CIO au Sénégal en 2024.

Conclusion

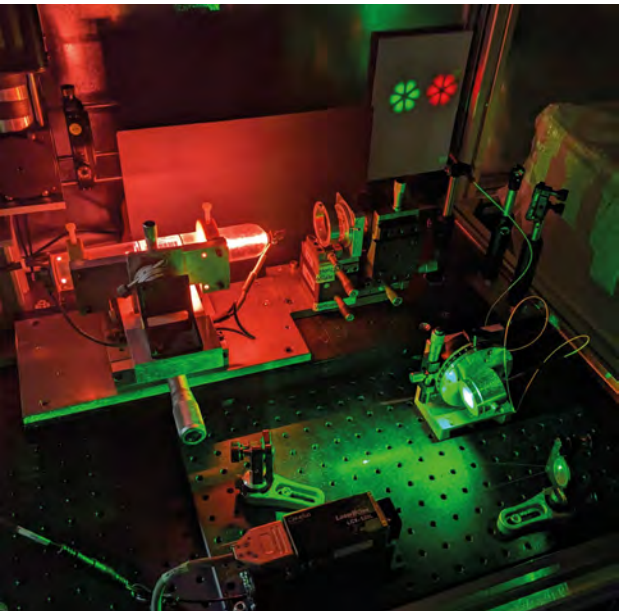
Les connaissances humaines croissent et ont dépassé depuis longtemps ce que peut embrasser l'esprit d'un seul être humain, les technologies se perfectionnent et se diversifient, les effectifs qui s'y consacrent sont en augmentation constante : les sociétés savantes, qui ont vocation à promouvoir le dialogue au sein de communautés scientifiques et entre ces communautés, sont tout naturellement appelées à se multiplier. La création de la SFO s'imposait : son succès en témoigne. Par sa vitalité et par son tissu de relations en France et à l'étranger, elle a su s'imposer comme une belle et forte composante dans le champ de la science française et de l'optique dans le monde. Animée, après Jean Bulabois, par des dizaines de personnes, c'est par ses membres et pour ses membres qu'elle est ce qu'elle est. ●

RÉFÉRENCE

[1] J. Bulabois, Photoniques **37**, 10 (2008)

Des défilés de modes… dans un bus

Collectif Scientibus
Université de Limoges, Faculté des Sciences et Techniques, 123 avenue A. Thomas, Limoges, F 87060
***dominique.pagnoux@xlim.fr**



Le « Scientibus » est un autobus transformé en un véritable laboratoire itinérant dans lequel le public peut participer à une grande quantité d'expériences scientifiques dont beaucoup relèvent de la photonique. Dans cet article, nous donnons l'exemple d'un enchaînement de démonstrations sur le thème de la propagation guidée dans les fibres optiques, en allant du phénomène de réflexion totale jusqu'à l'excitation modale sélective d'une fibre faiblement multimodale.

https://doi.org/10.1051/photon/202311825

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

En France comme dans beaucoup d'autres pays, on déplore depuis de nombreuses années une désaffection notoire du public, des jeunes en particulier, pour les sciences et les carrières scientifiques. Pour remédier à cette situation, il est nécessaire de revaloriser l'image des disciplines scientifiques, souvent jugées difficiles d'accès. Dans cette optique, un groupe de chercheurs et d'enseignants-chercheurs de l'université de Limoges et du CNRS s'est donné pour objectif de faire découvrir les aspects fascinants des sciences et de leurs applications à travers une collection d'expériences participatives, modernes et étonnantes, embarquées dans un bus transformé en une sorte de « mini Palais de la Découverte » itinérant (Fig. 1). Cet outil unique permet de transporter les expériences au plus près du public, dans les établissements scolaires ou à l'occasion de manifestations de diffusion de la culture scientifique. Ainsi est né le Scientibus dont la devise pourrait être inspirée par Lagardère : « si tu ne viens pas à la Science, la Science ira à toi » !

Depuis son inauguration par Claude Cohen-Tannoudji il y a bientôt 20 ans, le Scientibus parcourt les routes dans un rayon de 100 km autour de son port d'attache à la Faculté des Sciences et Techniques de Limoges. Il lui arrive même de s'aventurer beaucoup plus loin (festival « I love Science » à Bruxelles, congrès « Optique 2022 » à Nice) ! Animé par un collectif composé d'une trentaine de chercheurs, enseignants-chercheurs, techniciens, ingénieurs et doctorants, le projet Scientibus assure chaque année une trentaine de journées d'animations scientifiques, et accueille environ 3500 visiteurs dont 2500 scolaires.

Concrètement, le Scientibus est divisé en deux ateliers auxquels s'ajoute un atelier extérieur déployé dans une salle voisine ou sous un barnum. Avec cette organisation, trois groupes de 7 à 10 visiteurs chacun peuvent être accueillis simultanément par trois animateurs, en compagnie desquels ils vont pouvoir découvrir quelques-unes des 80 expériences ou démonstrations proposées au catalogue du Scientibus. Celles-ci couvrent les principaux domaines des sciences dites « dures », en particulier la physique avec, dans cette discipline, un large éventail de démonstrations relatives à l'optique-photonique, parmi lesquelles : effets stroboscopiques, polarisation et photoélasticimétrie, UV et fluorescence, imagerie IR, synthèse de prothèses céramiques par prototypage laser, interférométrie à décalage, transmissions par fibres optiques…

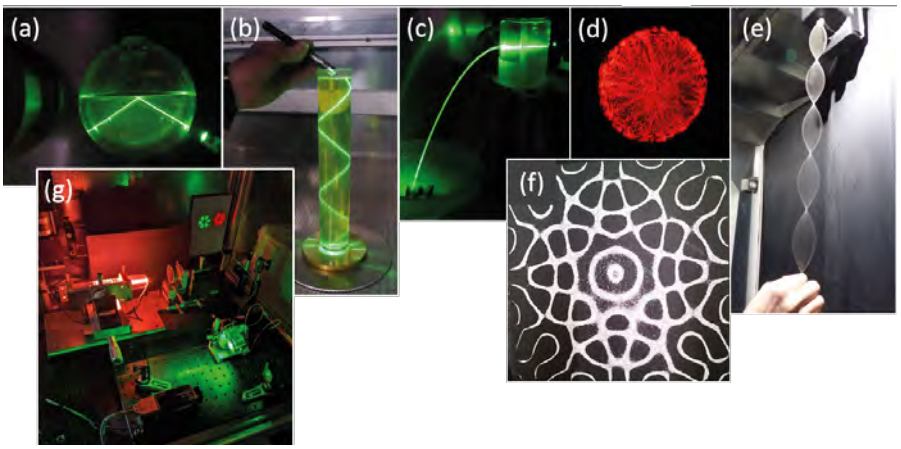
Figure 1 : Arrivée du Scientibus au campus Saint Jean d'Angely à Nice, à l'occasion de la conférence « Optique Nice 2022 » en juillet 2022

Évidemment, pour fonctionner correctement au sein du Scientibus, toutes ces démonstrations doivent satisfaire des conditions techniques drastiques : compacité, rapidité et simplicité de mise en œuvre, robustesse des réglages pour résister aux vibrations lors des déplacements du bus ou en présence du public, fiabilité. De plus, parce que le Scientibus veut pouvoir s'adresser à tous les publics - des plus jeunes aux plus anciens, des néophytes aux spécialistes- les concepteurs doivent veiller à proposer des expériences de niveaux scientifiques variés, idéalement avec une certaine progressivité. Pour cet article, nous avons choisi de présenter les démonstrations relatives à la transmission de la lumière par fibre optique qui illustrent bien cette gradation.

De l'initiation au phénomène de guidage...

Pour les scolaires et le public non initié, on commence par l'observation de la réfraction et de la réflexion totale du faisceau d'un pointeur laser plus ou moins incliné, traversant une fiole de verre sphérique à moitié remplie d'eau colorée avec de la fluorescéine (Fig. 2a). Puis, en injectant le faisceau du pointeur dans un tube de verre rempli du même liquide, on réalise une première démonstration de guidage de ce faisceau grâce aux réflexions totales successives aux interfaces tube air (Fig. 2b). Pour expliquer le phénomène, le public soupçonne souvent le tube de verre de jouer un rôle important. Aussi, pour prouver qu'il n'en est rien, on réalise la même démonstration dans un filet d'eau s'écoulant d'un réservoir (fontaine de Colladon) (Fig. 2c). À la suite de cette expérience, on montre une première exploitation pratique du phénomène de guidage avec le transport de lumière dans des fibres plastiques à gros cœur pour application à l'éclairage déporté. On évoque aussi les guides d'images en mettant entre les mains des visiteurs de véritables laparoscopes, coloscopes et bronchoscopes. On revient ensuite sur les fibres élémentaires avec l'observation de la propagation de la lumière d'un laser HeNe injectée dans une longue fibre multimode 50/125µm en silice. Celle-ci est déployée depuis le système d'injection jusqu'à un tambour autour duquel elle fait quelques centaines de tours avant de réaliser un parcours sinueux au plafond du bus (observation des pertes aux courbures) jusqu'à un écran sur lequel le visiteur peut observer le speckle rouge émergent (Fig. 2d). À ce moment, il est facile de simuler la transmission à longue distance d'un signal numérique en hachant le faisceau du laser en entrée et en produisant des clignotements du speckle à la sortie. Et pour prouver que de l'information intelligible peut être transportée par un signal lumineux modulé, nous avons mis en place une démonstration de transmission de musique en espace libre entre une diode laser rouge modulée par la sortie analogique d'une tablette et un photodétecteur couplé à un haut-parleur. En interposant un obstacle sur le trajet

Figure 2 : Enchaînement des démonstrations sur le guidage des modes dans les fibres optiques présentées dans le Scientibus: (a) réflexion totale ; (b) réflexions multiples ; (c) fontaine de Colladon ; (d) speckle à la sortie d'une fibre 50/125 ; (e) corde de Melde ; (f) mode de la plaque de Chladni ; (g) les deux dispositifs de sélection modale permettant d'afficher sur un écran les modes du laser HeNe (mode rouge à droite) et de la fibre (mode vert à gauche).



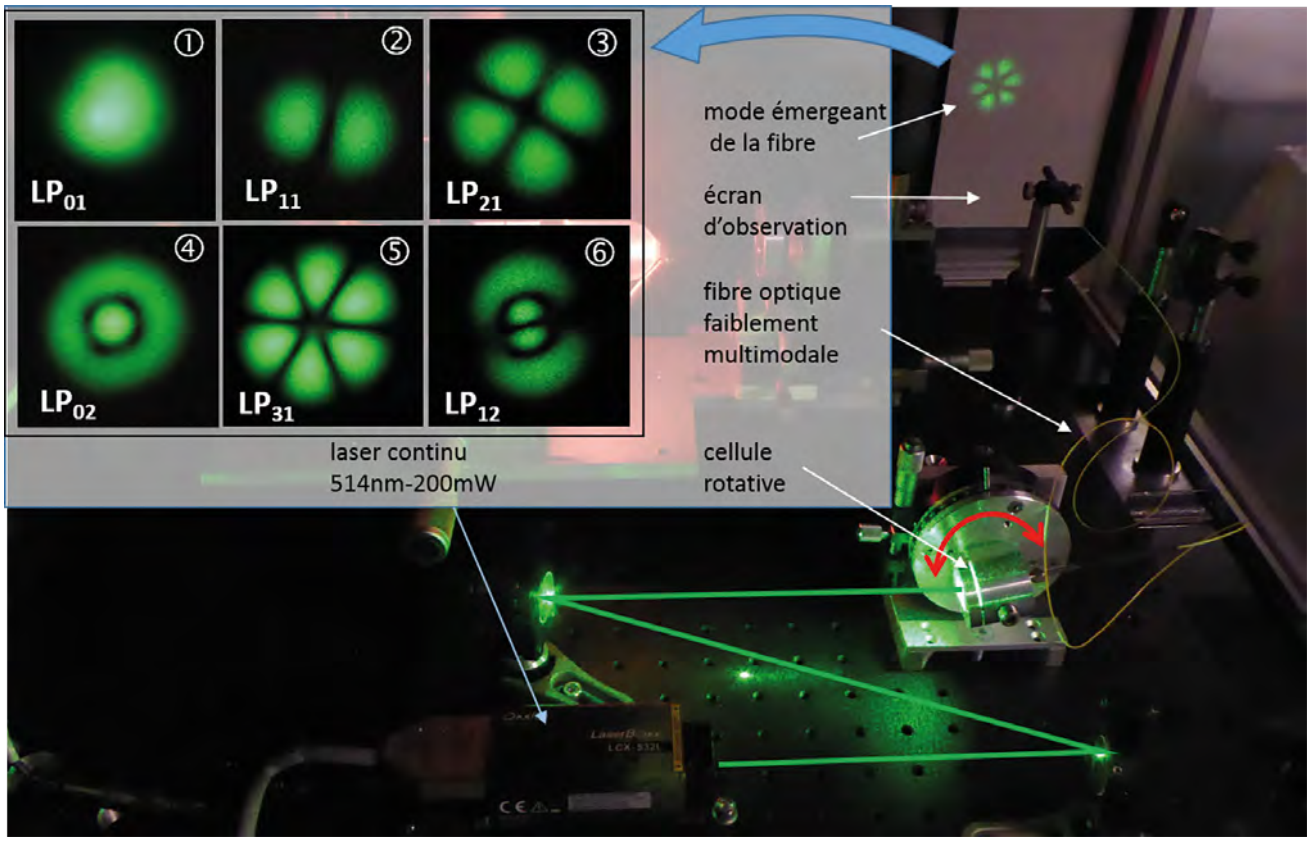


Figure 3 : Dispositif d'excitation modale sélective d'une fibre optique ; Encart : les modes excités, photographiés sur l'écran placé en sortie de fibre. Les nombres 1 à 6 indiquent l'ordre d'apparition des modes à mesure que l'angle entre le faisceau incident et la fibre est augmenté.

de la lumière, la main d'un visiteur par exemple, on interrompt la musique. Pour contourner ce problème, l'entrée et la sortie d'une longue fibre plastique à gros cœur sont basculées respectivement devant la diode laser et devant le détecteur pour rétablir la liaison. On peut alors disserter à volonté sur les systèmes de transmissions par fibres optiques longues distances et haut débit.

… à la découverte des modes des fibres et des lasers

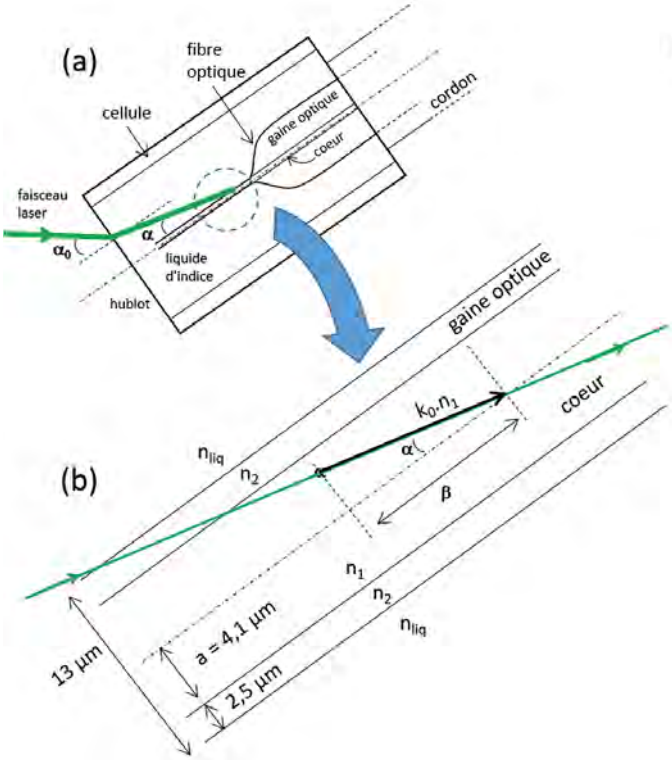
Pour un public plus averti, la séquence précédente peut être survolée voire complètement esquivée pour en venir directement à une série d'expériences un peu plus pointues concernant les modes de propagation dans les fibres multimodes. Le début de cette partie est naturellement l'observation sur l'écran du speckle émergeant de la fibre multimode 50/125µm (Fig. 2d), avec son aspect tavelé changeant quand la fibre est perturbée ou quand les conditions d'injection sont modifiées. Avant d'aller plus loin, il peut être utile de rappeler la notion de « mode de vibration », que l'on peut illustrer avec une corde de Melde qui est une ficelle tenue à une extrémité par un visiteur, plus ou moins tendue, et attachée à un vibreur à son autre extrémité. Avec une tension adéquate de la corde, un mode 1D s'établit, dont on observe facilement les nœuds et les ventres (Fig. 2e). En modifiant la tension, l'expérimentateur change le mode de vibration de la corde. Dans un deuxième temps, on produit une onde stationnaire 2D en excitant une plaque métallique horizontale avec un vibreur (plaque de Chladni). Dans ce cas, c'est en modifiant la fréquence du vibreur que l'on change la nature des modes de vibration, ceux-ci étant visualisés en saupoudrant la plaque de sable fin (accumulation le long des nœuds) (Fig. 2f). Les notions indispensables étant maintenant introduites, on peut revenir au cas de la fibre optique cylindrique dans le cœur de laquelle l'onde lumineuse résonne spatialement pour produire des modes transverses de Laguerre-Gauss 2D. Des exemples de ces modes calculés par résolution des équations de Maxwell sont présentés sur une affiche, et le public comprend que le speckle observé résulte de la superposition de ces modes plus ou moins déphasés entre eux.

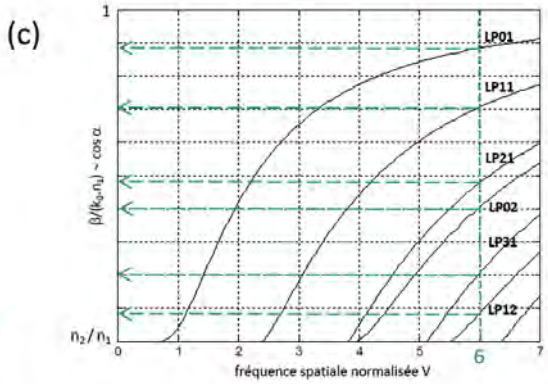
À ce stade, la découverte du phénomène de guidage a déjà bien progressé depuis la simple observation du phénomène de réflexion totale d'un rayon lumineux… mais il est possible d'aller encore plus loin ! Pour cela, deux nouvelles démonstrations installées dans le bus permettent de sélectionner, soit ●●●

dans une fibre optique soit dans un laser HeNe, des modes transverses purs et de les projeter sur un écran pour les observer à loisir. Le premier dispositif, inspiré par les travaux de S. Shaklan en 1991, permet de réaliser une excitation modale sélective dans une fibre faiblement multimode dans le visible [1]. La fibre est préalablement amincie à une extrémité par attaque à l'acide fluorhydrique de sorte que l'épaisseur de gaine optique résiduelle ne soit plus que d'environ 2,5 µm (voir encart). La pointe est ensuite insérée dans une cellule remplie de liquide d'indice et munie à l'avant d'un hublot perpendiculaire à l'axe de cette fibre. À l'arrière, la fibre est hermétiquement scellée à la cellule pour éviter toute fuite de liquide d'indice. À travers le hublot,

PRINCIPE DE L'EXCITATION MODALE SÉLECTIVE D'UNE FIBRE OPTIQUE PAR AJUSTEMENT DE L'INCLINAISON D'UN FAISCEAU INCIDENT LATÉRAL

Les paramètres optogéométriques de la fibre sont les indices du cœur et de la gaine optique, ainsi que le rayon du cœur, notés respectivement n_1, n_2 et a. La Figure (a) montre le faisceau du laser adressé sur la fibre amincie à travers le hublot de la cellule remplie de liquide d'indice ($n = n_{liq} \sim n_2$). Le faisceau incident fait un angle α_0 avec la normale au hublot, et le faisceau réfracté fait un angle α avec l'axe de la fibre. La figure (b) est un zoom sur la pointe de la fibre où les réfractions du faisceau laser aux interfaces ne sont pas représentées du fait de la très grande proximité entre les indices n_1, n_2 et n_{liq}. Le module du vecteur d'onde associé au faisceau dans le cœur est $k_0.n_1$ et la constante de propagation associée vaut $\beta \sim k_0.n_1.\cos\alpha$ (si on néglige les déphasages de Goos-Hänchen). D'un autre côté, par résolution de l'équation de dispersion dans les fibres cylindriques, on peut tracer les courbes de dispersion associées aux différents modes transverses (Figure (c)). Pour la fibre que nous utilisons (a = 4,1µm, ouverture numérique ON = 0,12), la fréquence spatiale normalisée est $V = k_0.a.ON \sim 6$ à la longueur d'onde du laser (532nm). Pour chaque mode LPmn, on peut lire sur la courbe correspondante sa constante de propagation réduite $\beta_{mn}/(k_0.n_1) \sim \cos\alpha_{mn}$ et en déduire la valeur de l'angle α_{mn} associé. Ainsi, lorsque l'angle α du faisceau adressé dans le cœur de la fibre correspond à l'angle α_{mn}, le mode LP_{mn} pur est excité dans la fibre. L'angle α_0 est relié à αmn par la relation de la réfraction de Snell-Descartes.





le faisceau d'un laser vert (Oxxius LCX-532-L, 532 nm, 200 mW) faisant un petit angle α avec l'axe de la fibre est adressé sur le côté de la pointe, pour induire un couplage frustré de la lumière dans le cœur. L'angle d'incidence est ajusté en modifiant l'inclinaison de la cellule. Lorsque l'inclinaison du rayon dans le cœur correspond à celle du vecteur d'onde associé à un mode transverse, on excite sélectivement ce mode (voir l'encart). En l'absence de couplage, celui-ci émerge, pur, à la sortie de la fibre et s'affiche sur un écran. En modifiant petit à petit l'angle de la cellule, on obtient donc un véritable défilé de modes sur l'écran. Avec notre fibre (fibre SMF28, diamètre de cœur = 8,2 µm, ON = 0,12, longueur = 1 m, diamètre de la pointe = 13 µm), nous pouvons observer une succession de 6 modes transverses linéairement polarisés (LP) à 532 nm, du mode fondamental au mode $LP_{1,2}$ en faisant varier l'inclinaison de la cellule sur une plage de 4° (Fig. 3).

Le deuxième dispositif est fondé sur un filtrage spatial intracavité dans un laser He-Ne spécialement conçu. Celui-ci est constitué d'un tube de large diamètre intérieur, fermé d'un côté par un miroir scellé et de l'autre par une fenêtre de Brewster (fabricant Melles Griot), la cavité étant elle-même fermée par un miroir de sortie éloigné d'une dizaine de centimètres de la fenêtre de Brewster. Le faisceau émis est étendu à l'aide d'une lentille de courte focale (f= 8 mm) placée en sortie du laser, avant d'être adressé sur un écran pour son observation (diamètre du spot sur l'écran = 8 cm). Du fait de son grand diamètre intérieur, ce laser est fortement multimode transverse. L'intervalle entre la fenêtre de Brewster et le miroir de sortie permet d'insérer des obstacles diffractants qui agissent sur la forme du faisceau. Dans notre cas, ces obstacles sont deux fils métalliques fins (ϕ= 50 µm), placés l'un devant l'autre dans des plans P et P' perpendiculaires au faisceau, et pouvant être translatés ou pivotés dans leurs plans respectifs, indépendamment l'un de l'autre. Leur rôle est d'imposer des lignes de zéros (= lieux d'annulation) dans le champ transverse oscillant dans la cavité. De ce fait, ils sélectionnent, dans la collection des modes Hermite-Gaussiens (HG) ou Laguerre-Gaussiens (LG) susceptibles d'osciller (modes transverses auto-transformés de Fourier), le mode d'ordre le plus bas présentant ces lignes de zéros. Ainsi, avec les deux fils perpendiculaires entre eux et hors d'axe, on sélectionnera un mode HG $TEM_{p,q}$ (motif rectangulaire à p lignes noires dans une direction et q lignes noires dans la direction perpendiculaire) [2] (Fig. 4a). Et avec les deux fils positionnés sur l'axe du faisceau avec un angle de π/m entre eux, on sélectionnera le mode LG $TEM_{0,m}$ (rosace de lumière à 2m lobes)[3,4] (Fig. 4b). Dans la famille des modes HG, ce laser peut émettre n'importe quel mode $TEM_{p,q}$ pur, avec (p+q) ≤ 7.

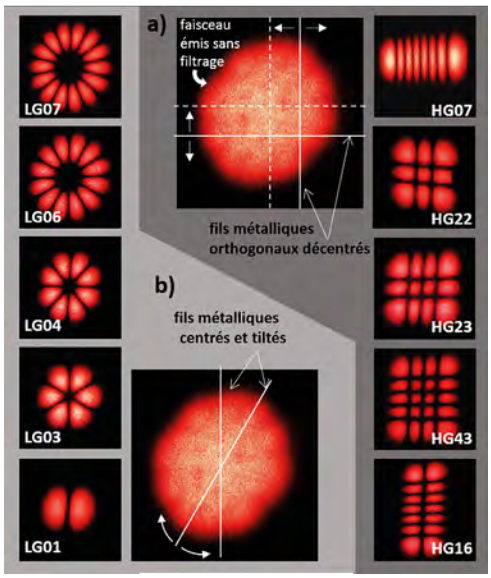


Figure 5 : Modes sélectionnés par filtrage intra-cavité dans un laser HeNe effectué à l'aide de deux fils métalliques fins. a) Modes de Hermite-Gauss (HG) sélectionnés par décalage vertical ou horizontal des fils maintenus orthogonaux ; b) Modes de Laguerre-Gauss (LG) sélectionnés par ajustement de l'angle entre les fils se croisant sur l'axe.

Dans la famille des modes LG, le mode d'ordre le plus élevé accessible est le mode $TEM_{0,7}$ (14 lobes). L'ordre des modes accessibles est borné essentiellement par la dimension transverse du tube.

Les deux dispositifs décrits ci-dessus, sont installés côte à côte dans le bus (Fig. 2g) et les modes qu'ils produisent sont adressés sur le même écran, ce qui permet, entre autre, de mettre en évidence la parfaite ressemblance entre les modes LG TEM0q du laser et les modes LP_q1 de la fibre (1 ≤ q ≤ 3).

Ces deux dernières démonstrations sont particulièrement intéressantes pour des étudiant(e)s de licence ou de master en photonique pour lesquelles elles présentent un caractère pédagogique évident. Mais elles fascinent également le grand public du fait de leur fort impact visuel et de leur rendu esthétique.

Conclusion

Cet article met en lumière le Scientibus, un laboratoire itinérant conçu par des chercheurs et enseignants-chercheurs de l'Université de Limoges pour diffuser la culture scientifique en direction d'un très large public. À travers l'exemple du guidage de la lumière dans les fibres optiques, nous montrons comment une sélection d'expériences et de démonstrations appropriées permet une compréhension graduelle des concepts mis en jeu.

L'opération Scientibus bénéficie du soutien de nombreux partenaires cités en page d'accueil de son site internet (https://scientibus.unilim.fr/).

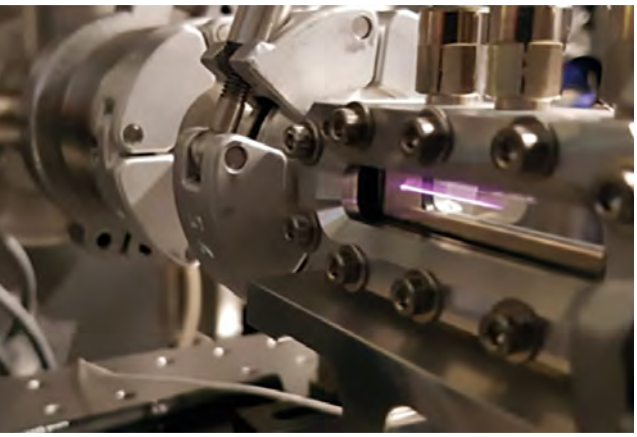
RÉFÉRENCES

[1] S. Shaklan, Opt. Lett. **30**, 4379 (1991)
[2] S.-C. Chu *et al.*, Opt. Express **7**, 7128 (2012)
[3] P. Facq, F. de Fornel and F. Jean, Elect. Lett. **20**, 613 (1984)
[4] P. Faugeras *et al.*, Opt. Commun. **90**, 35 (1992)

LASERIX : UNE PLATE-FORME POUR LE DÉVELOPPEMENT LARGE SPECTRE D'APPLICATIONS DE LA LUMIÈRE INTENSE

Elsa BAYNARD[1], Kevin CASSOU[1], Pierre DROBNIAK[1], Julien DEMAILLY[1], Olivier GUILBAUD[1], Adrien KRAYCH[1], Bruno LUCAS[1], Max MAILLET[1], Alok Kumar PANDEY[2], Moana PITTMAN[1], David ROS[1], Xavier SARAZIN[1], Fabrice Sanson[2] and Sophie KAZAMIAS[1,*]

[1] IJClab, Bât. 100, 15 rue Georges Clémenceau, 91405 Orsay cedex UMR9012 – CNRS / Université Paris-Saclay / Université Paris Cité
[2] Imagine Optic, 18 rue Charles de Gaulle, Orsay F-91400, France
*sophie.kazamias@universite-paris-saclay.fr



LASERIX est une plateforme de l'IJClab sur le campus de l'Université Paris Saclay. Le laser est une chaîne CPA de niveau 50 TW à 10 Hz. Des thématiques de recherche en rapport avec la physique des deux infinis sont menées en parallèle avec une vocation affirmée d'ouverture à la formation. Nous présentons un panorama sur les sources XUV de lumière structurée, l'accélération laser plasma et des études prospectives sur l'étude des propriétés du vide soumis à un champ électromagnétique ultra-intense.

https://doi.org/10.1051/photon/202311830

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 plateforme LASERIX [1] a été fondée au début des années 2000 sur le campus d'Orsay. Elle fait partie depuis lors des quelques installations françaises de chaînes laser de puissance de type CPA (Chirped Pulsed Amplification) de niveau typique 50 TW (5.10^{16} W). Elle fournit 10 fois par seconde des impulsions d'énergie maximale 2,5 Joule, de durée 40 fs (4.10^{-14} s). Cette impulsion principale est accompagnée de répliques de plus basse énergie à des longueurs d'onde et des délais ajustables à l'échelle femtoseconde pour des expériences pompe-sonde. LASERIX est une chaîne semi-commerciale qui n'a cessé d'être mise à l'état de l'art par collaborations permanentes avec les industriels locaux (notamment la société Amplitude Laser). En 20 ans, de nombreux éléments de la chaîne ont été changés et les dispositifs de contrôle les plus avancés ont été implantés (miroir déformable, stabilisateurs de pointé et de fréquence, contrôle actif du profil spectral et temporel, etc.) C'est également ●●●

EDP Sciences lance une nouvelle collection :

Institut d'Optique Graduate School Textbook

Parution le 25/08/2022 du premier ouvrage :

Optical Models for Material Appearance

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

The author, **Mathieu Hébert**, is professor assistant at Institut d'Optique Graduate School

ISBN 978-2-7598-2647-6
260 pages, 95 €

En vente sur laboutique.edpsciences.fr (section des livres en anglais)

la seule plate-forme de ce type installée dans un laboratoire de l'IN2P3 (Institut National de Physique des Particules et de Physique Nucléaire) du CNRS. Les programmes de recherche qui sont menés sur cette installation vont de la thématique historique sur les sources secondaires de rayonnement EUV (Extrême ultraviolet), à l'accélération laser plasma et à l'étude prospective d'effets de QED (Electrodynamique Quantique) dans le vide en présence d'un champ laser extrêmement intense. Ces effets n'ont jamais encore été observés à ce jour compte tenu du manque de disponibilité des sources capables de les produire significativement.

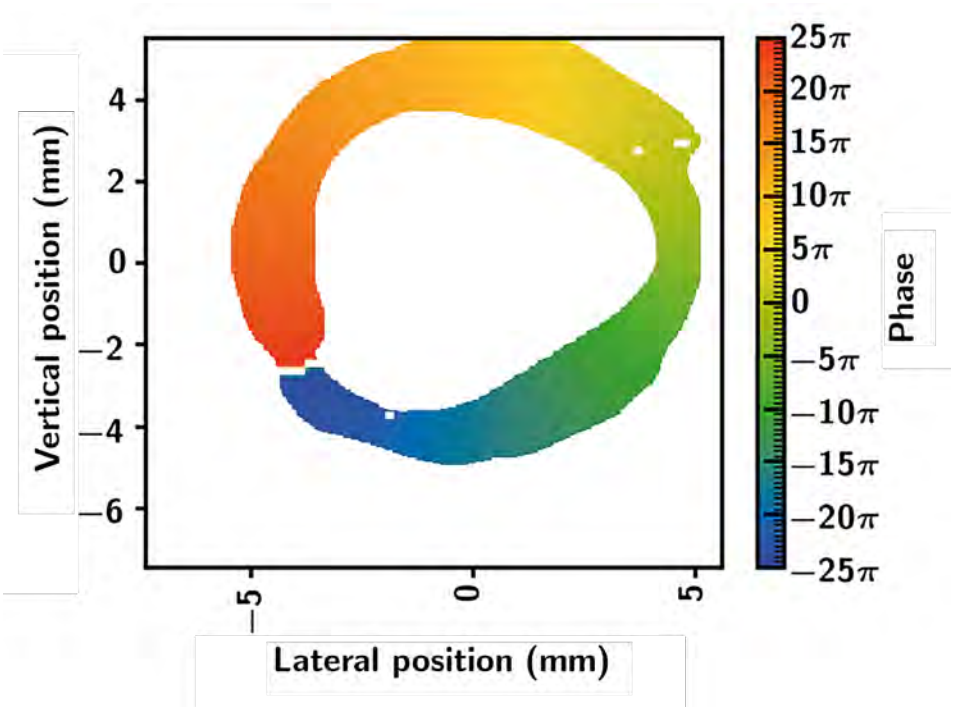


Figure 1. Image d'un analyseur de front d'onde Hartmann pour un faisceau vortex de l'harmonique 25 générée à partir d'un faisceau infrarouge portant un moment l=1, reconstruction du profil d'intensité (à gauche) et du profil de phase (à droite).

LES SOURCES DE LUMIÈRE COHÉRENTE XUV PORTANT DES MOMENTS ORBITAUX ANGULAIRES

LASERIX contribue à un domaine très actif de la recherche actuelle sur les sources de lumière exotiques dans l'extrême ultraviolet (EUV), une gamme de longueur d'onde de quelques dizaines de nanomètres et dont les photons portent des énergies de quelques dizaines d'eV. C'est typiquement celle produite sur des synchrotrons comme SOLEIL mais les sources EUV générées par laser peuvent être naturellement plus compactes et intrinsèquement cohérentes (durées d'impulsions sub picoseconde). Les vortex optiques sont des faisceaux lumineux portant un moment orbital angulaire qui se traduit par une phase spatiale en spirale qui varie comme le produit du moment orbital par l'angle azimutal autour de l'axe de propagation. Les modes propres ont une forme annulaire et les propriétés d'interaction de cette lumière avec la matière sont étonnantes et nouvelles. En France, la thématique des vortex optiques EUV a été introduite par une équipe du LIDYL (CEA Saclay) qui a démontré la possibilité d'obtenir par génération d'harmonique d'ordre élevé (par exemple q=25) [2] dans un gaz un vortex optique de lumière EUV à partir d'un vortex infrarouge de pompe (portant l=1) en suivant la loi qui traduit le fait que le moment orbital angulaire porté par l'harmonique q d'un faisceau généré par un laser de moment angulaire initial l est bien ql. LASERIX a été pionnier dans la caractérisation quantitative de ces faisceaux [3] en démontrant qu'il était possible de mesurer directement la phase spatiale des vortex EUV avec un dispositif de mesure de front d'onde de type Hartmann (en collaboration avec la société Imagine Optic). Expérimentalement cela implique de mesurer une phase spatiale qui varie de 50 π sur un tour dans une gamme de longueurs d'onde courtes. Nous avons pu montrer que la pureté des modes obtenus par transformée de Fourier azimutale du profil d'amplitude et de phase mesuré n'était pas parfaite compte tenu du caractère non perturbatif de la génération d'harmoniques mais que la quantité de photons produits et la qualité et la stabilité de ces faisceaux permettait de les utiliser pour explorer de nouveaux régimes de l'interaction lumière matière.

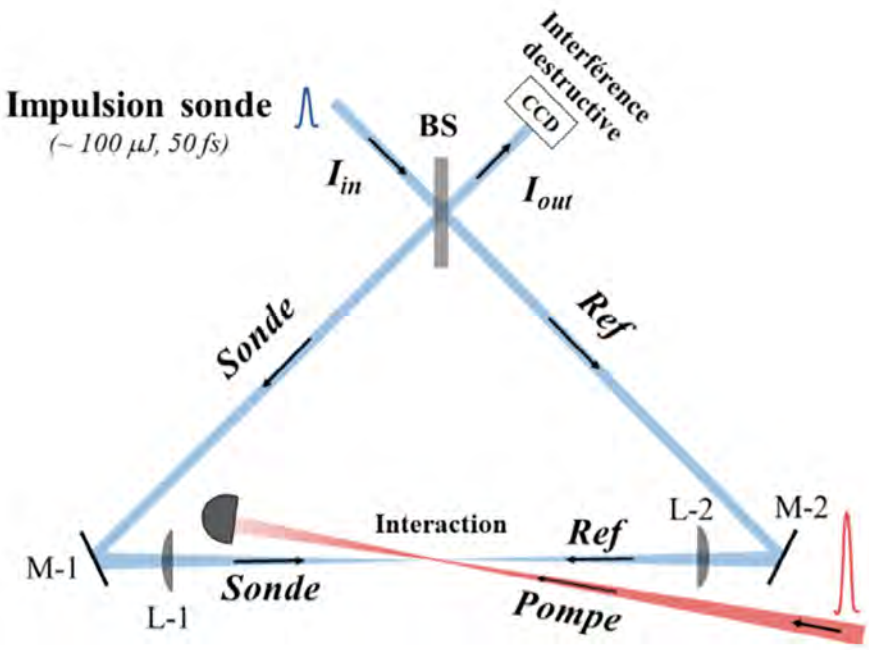
Une fois ces faisceaux vortex obtenus par génération d'harmoniques caractérisés, nous les avons amplifiés dans un plasma d'ions multichargés. Ce plasma est pompé par une série d'impulsions laser intenses pour induire une inversion de population transitoire de quelques picosecondes correspondant à une transition laser dans le domaine EUV (32,6 nm). On parle alors de laser X : cette technique d'amplification d'harmonique est délicate à mettre en œuvre expérimentalement car elle exige une excellente superposition spectrale, spatiale (précision du micron) et temporelle (picoseconde ou moins) entre le faisceau à amplifier et la fenêtre de gain. Elle est démontrée depuis une vingtaine d'année pour des faisceaux gaussiens. L'injection dans ce milieu à gain d'une portion de faisceau vortex aboutit bien à une amplification et permet

également de révéler en champ lointain le caractère rotatoire de la lumière vortex. On observe que le faisceau amplifié est dévié angulairement d'une quantité qui dépend directement du moment angulaire porté par le faisceau : par exemple le sens de la rotation dépend du signe algébrique du moment.

L'ACCÉLÉRATION LASER PLASMA : LE PROJET PALLAS

Depuis des avancées expérimentales majeures dans lesquelles la France a été pionnière dès le début 2000 tant par ses laboratoires de recherche que par ses entreprises laser, l'accélération laser plasma est à un stade où elle doit démontrer la maturité de sa technologie pour imaginer que dans un futur proche on construise effectivement une nouvelle génération d'accélérateurs compacts pour la physique des particules, les nouvelles sources de lumière type bêtatron ou XFEL, ou les applications médicales avec des particules ou des rayonnements secondaires. Les champs accélérateurs supérieurs de plus de trois ordres de grandeur à ce qui peut être obtenu avec les technologies RF conventionnelles les plus avancées motivent cette recherche mais de nombreux verrous doivent encore être levés. Ils concernent la stabilité et la qualité des faisceaux de même que la cadence maximale de tirs que l'on peut atteindre avec un coût énergétique acceptable. C'est l'objet du projet européen EUPRAXIA dont la France est partenaire à travers notamment le projet PALLAS auquel contribue LASERIX. Ce projet vise à concevoir le premier étage d'un accélérateur : un injecteur, qui produit un faisceau d'électrons relativistes d'énergie modérée (200 MeV) mais de qualité contrôlée en énergie, charge, pureté spectrale et spatiale. Si la physique du processus est globalement comprise, son caractère hautement non linéaire, mis en regard de la difficulté à caractériser donc à contrôler très précisément tir à tir des spécifications complexes du profil spatio-spectro-temporel du laser rendent la tâche exaltante. On prévoit un couplage avec les nouvelles technologies de simulation et de gestion instantanée de quantités massives de données qui permettent de mettre en place des boucles de stabilisation. À l'issue, ce faisceau pourra être ● ● ●

Figure 2. Schéma de principe de l'interféromètre de Sagnac pour la détection d'effets de QED dans le vide soumis à un champ électromagnétique lumineux extreme.



MESO

A NEW TOOL FOR INTERFEROMETRY APPLICATIONS

Insensitive to vibrations

At-wavelength metrology

Flat surfaces from 1.5 to 6"

Parallel optics testing

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

imagine optic

accéléré vers des énergies supérieures à la dizaine de GeV s'il est injecté après mise en forme dans un étage purement accélérateur.

RALENTIR LA VITESSE DE LA LUMIÈRE DANS LE VIDE AVEC DES IMPULSIONS LASER INTENSES

La vitesse de la lumière dans le vide est l'une des grandes constantes universelles en physique. Elle définit désormais l'unité de temps et de longueur d'espace. Pourtant la théorie quantique de l'électromagnétisme (QED) prédit que l'indice optique de la lumière dans le vide devrait augmenter lorsque ce dernier est soumis à un champ électromagnétique intense [5]. Cette étonnante propriété n'a encore jamais été observée.

L'expérience DeLLight (Deflection of Light by Light) cherche à mesurer cet effet en utilisant des impulsions laser ultra brèves (femtosecondes) et ultra intenses. L'impulsions laser intense, dite pompe, est focalisée dans un volume de vide de quelques centaines de micromètres cube, produisant des champs électriques et magnétiques extrêmement intenses. Une seconde impulsion laser de basse intensité, dite sonde, traverse au même instant ce volume de vide modifié. Ce faisceau sonde est alors dévié en présence d'un gradient d'indice, comme cela est observé dans les mirages. Une mesure positive par l'expérience DeLLight serait un résultat majeur. Cela démontrerait expérimentalement que la vitesse de la lumière dans le vide peut être réduite, au sens classique du terme à l'échelle macroscopique, en présence de champs intenses.

La déviation prédite dans les conditions de l'expérience DELLIGHT sur LASERIX est extrêmement faible, de quelques dixièmes de picoradians (correspondant à la déviation d'une distance de la taille d'un atome après 1 km de propagation). Cette déviation est détectée grâce à l'utilisation d'un interféromètre dit de Sagnac qui permet d'amplifier le signal recherché. Le principe est de faire interférer de façon destructive l'impulsion déviée (sonde) par la même impulsion non perturbée (référence). Plus l'interféromètre sera bien réglé, sans aucun défaut d'alignement, plus l'extinction sera forte en sortie de l'interféromètre et plus le signal recherché sera élevé. L'objectif est d'atteindre une extinction de 4.10−6 correspondant à une amplification d'un facteur 250 du signal de déflection. Avec l'énergie disponible sur LASERIX, cela correspond à une déflection de l'ordre de 0,02 nm. Il faut également être capable de focaliser extrêmement précisément les impulsions laser dans l'interféromètre sans détériorer la sensibilité de mesure de ce dernier. Enfin il faut pouvoir mesurer très précisément (à 10 nanomètres près) la position transverse de l'impulsion laser en sortie de l'interféromètre afin de pouvoir détecter un signal positif après environ 1 mois de données collectées à la cadence de 10 Hz, soit des dizaines de millions de tirs. Ce sont là les enjeux technologiques de ce projet.

Une mesure positive par l'expérience DeLLight serait un résultat majeur. Cela démontrerait expérimentalement que la vitesse de la lumière dans le vide peut être réduite, au sens classique du terme à l'échelle macroscopique, en présence de champs intenses.

CONCLUSION

Les sources laser de lumière ultra-intenses permettent de créer des conditions d'interaction lumière matière dont les horizons sont sans cesse repoussés par les nouvelles sources disponibles (le paramètre clé étant l'énergie mais il ne faut toutefois pas négliger la cadence de tir) avec désormais plusieurs propositions concrètes d'expériences visant à tester d'ici quelques années de nouveaux régimes de QED dans le vide (limite de Schwinger notamment). Pour les applications les plus anciennes comme les sources de rayonnement XUV et l'accélération laser plasma, largement étudiée depuis 20 ans, les enjeux actuels se situent plutôt dans une phase de maturation des technologies pour aboutir à des sources fiables, compactes et de haute cadence, pour des utilisateurs qui pourront ignorer les principes et la complexité requises pour produire ce type de source. La plateforme LASERIX, en contact des communautés de chercheurs fondamentaux et ingénieurs, d'étudiants et d'industriels du domaine mène en parallèle ces activités qui bénéficient l'une l'autre de progrès fondamentaux ou technologiques.

RÉFÉRENCES

[1] http://hebergement.universite-paris-saclay.fr/laserix/fr/

[2] https://doi.org/10.1051/978-2-7598-2719-0

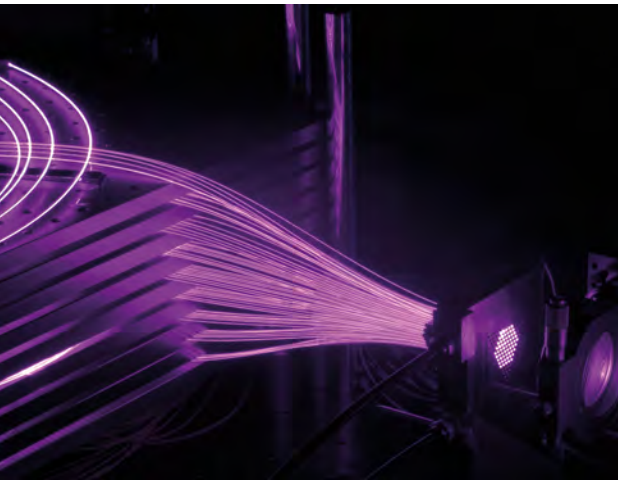
[3] F. Sanson, Opt. Lett. **43**, 2780 (2018)

[4] https://www.in2p3.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/vers-une-infrastructure-europeenne-pour-la-rd-sur-les-accelerateurs-plasma

[5] S. Robertson, Phys. Rev. A **100**, 063831 (2019)

LE LASER XCAN : FAÇONNER LA LUMIÈRE EN MODE DIGITAL

Jean-Christophe CHANTELOUP*, Ihsan FSAIFES
Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses, École Polytechnique, 91120 Palaiseau, France
***jean-christophe.chanteloup@polytechnique.fr**



L'avènement des lasers à combinaison cohérente de multiples faisceaux est à l'origine d'un changement de paradigme dans le domaine de l'architecture laser. L'opérateur de ce nouveau type de source lumineuse se voit en effet offrir la possibilité d'agir canal par canal sur les caractéristiques des faisceaux lasers individuels afin de façonner la distribution d'énergie optimale du faisceau recombiné requise pour l'application visée. Une telle approche digitale de la mise en œuvre d'une source cohérente très puissante (GW crête/kW moyen) ouvre un vaste champ applicatif.

https://doi.org/10.1051/photon/202311835

XCAN est un programme de recherche en physique du laser ayant pour objectif de concevoir, intégrer et étudier de nouvelles architectures laser reposant sur des Réseaux d'Amplificateurs laser Cohérents (Coherent Amplification Network). Proposé par G. Mourou au milieu des années 2010 puis mis en œuvre conjointement par L'Ecole Polytechnique (d'où l'acronyme XCAN) et la société Thales, il héberge un prototype opérant dans la gamme du kilowatt de puissance moyenne en régime sub-picoseconde dans l'infra-rouge proche (1µm). Le terme consacré dans la littérature scientifique pour décrire l'approche amplificatrice utilisée est la combinaison cohérente de faisceaux ou CBC (Coherent Beam Combination). Le projet XCAN fut mentionné la première fois dans ces colonnes par M. Antier dans son article sur la combinaison cohérente de fibres amplificatrices [1].

Ajuster la distribution de la lumière à des besoins expérimentaux ou industriels spécifiques est une quête aussi ancienne que l'ingénierie optique. Cependant, ce n'est qu'avec l'invention du laser en 1960 [2] qu'il a été possible de commencer à utiliser de la lumière cohérente à cette fin. Le développement des techniques de combinaison cohérente de multiples faisceaux laser a ouvert la voie à un changement de paradigme dans le domaine de l'architecture laser où la manipulation de la lumière s'effectue en amont et plus seulement en aval de la source lumineuse en tant que telle. Ainsi l'ingénieur opticien se voit offert la possibilité de façonner la source la plus pertinente pour son application. Nous présentons ici un prototype laser que nous qualifions de digital où amplitude et phase (et à terme polarisation) peuvent être ajustées à l'échelle d'un « pixel » (faisceau) élémentaire pour façonner une distribution de champ électrique source arbitraire pour un large champ applicatif.

P61, LE PROTOTYPE À 61 CANAUX

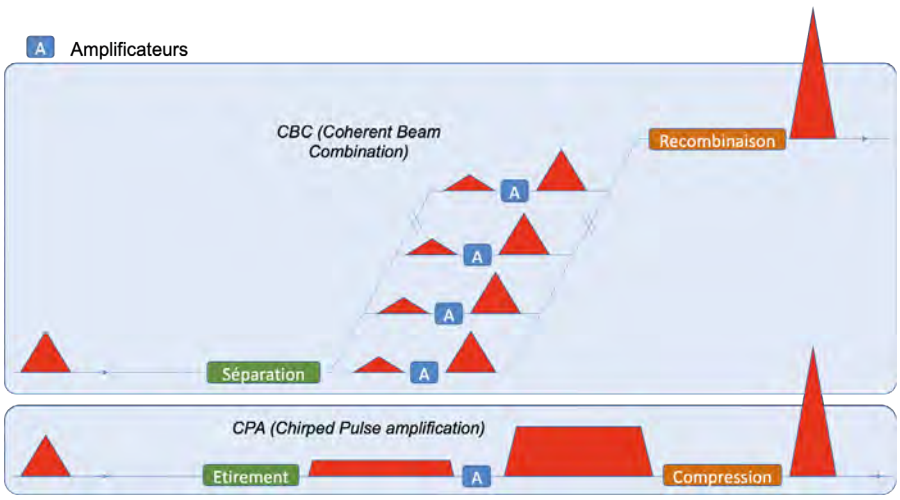
L'architecture

Bien que le premier laser à fibre ait été mis au point très vite dans les années 60 [3], il n'est apparu sur le marché que vers la fin des années 1980 concomitamment à l'amplification à dérive de fréquence. Cette technique connue sous son acronyme anglo-saxon CPA pour Chirped Pulse Amplification [4,5] permet l'amplification d'impulsions ultracourtes en les étirant temporellement, les amplifiant puis les recomprimant, s'affranchissant ainsi des effets délétères induits par la propagation d'impulsions très intenses dans les milieux laser à gain. La CBC peut être vue comme le pendant spatial de la CPA. Tandis qu'avec cette dernière méthode, l'énergie de l'impulsion est distribuée dans le temps (selon son axe de propagation), la CBC utilise quant à elle la distribution spatiale de la puissance vers plusieurs faisceaux pour un processus d'amplification parallélisé avant une addition cohérente finale comme illustré sur la figure 1. Le prototype P61 du projet XCAN [6] repose sur un train d'impulsions ~300fs à haute cadence (de 300kHz à 55MHz) générées initialement par un oscillateur laser unique. Elles sont, dans un premier temps, étirées temporellement sur quelques nanosecondes, puis les trains sont répliqués et séparés spatialement en 61 canaux d'amplification, pour être finalement recombinés puis recomprimés. L'architecture est donc celle d'un laser CBC inséré dans un schéma CPA. Le système laser est quasi intégralement fibré jusqu'au niveau de la tête laser illustrée sur la figure 2. Les quatre fibres dopées à l'Ytterbium que l'on y aperçoit supportent un mode relativement large de 30 µm de diamètre, leur conférant un potentiel amplificateur conséquent.

Les asservissements

Afin d'obtenir une bonne addition cohérente des 61 faisceaux, des contraintes spatiales et temporelles s'imposent. D'une part l'agencement des faisceaux les uns par rapport aux autres doit être extrêmement régulier avec un écartement constant au micromètre près et un positionnement angulaire relatif au milliradian près. La tête laser a été conçue dans cette logique à l'aide d'un empilement de manchons en zircone dans lesquels s'insèrent les fibres amplificatrices dotées d'une férule de diamètre externe

Figure 1. Synoptiques de la Combinaison Cohérente de Faisceaux (CBC) et de l'Amplification à Dérive de Fréquence (CPA) illustrant les caractères spatiaux et temporels du même concept de réduction de la puissance crête avant amplifications puis additions finales spatiales et temporelles



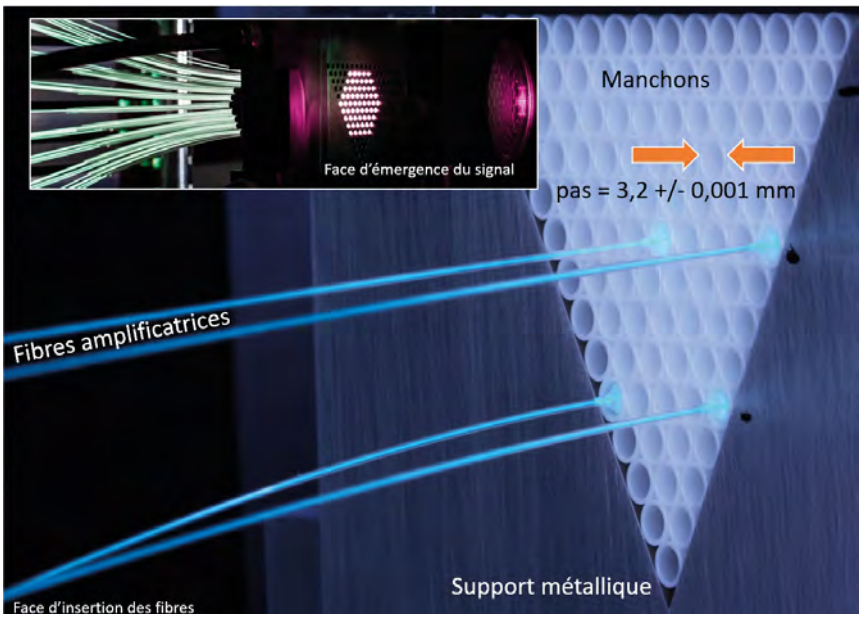
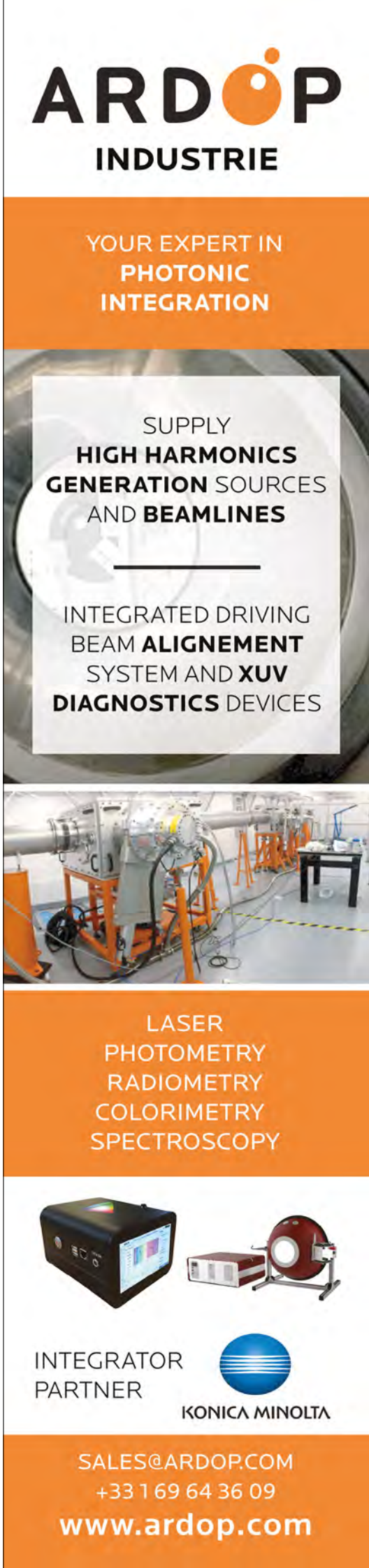


Figure 2. Vues des faces d'insertion des fibres amplificatrices et d'émergence du signal (encart) au niveau de la tête laser.

identique au diamètre interne des manchons. Les éléments métalliques de la tête laser ont été produits par fabrication additive (impression 3D de métal) permettant ainsi de les doter de multiples petits canaux internes maximisant le coefficient d'échange avec le fluide caloporteur (de l'eau) y circulant. Il y a en effet plus d'un kilowatt moyen de puissance lumineuse émergeant de cet ensemble de 61 fibres regroupées sur moins de 7 cm² de section globale au niveau de la tête.

D'autre part le positionnement temporel des trains d'impulsions les uns par rapport aux autres doit lui aussi être extrêmement précis avec une tolérance ne dépassant pas une fraction de femtoseconde. A cette fin, deux boucles d'asservissement principales sont mises en œuvre, toutes deux pilotées *via* l'analyse temps réel d'un interférogramme (figure 3, gauche) obtenu par interférence entre l'ensemble des 61 faisceaux (issus de la tête laser, puis collimatés par un réseau de lentilles collectif hexagonal) et un faisceau de référence issu d'une 62ème fibre spécifiquement mise en place dans ce but.

Dans un premier temps, c'est le contraste des franges de chacune des 61 sous-pupilles qui est maximisé en agissant sur des lignes à retard (figure 4). La fibre optique est sectionnée en amont de l'étage amplificateur, l'une des extrémités placée sur une platine motorisée. L'ajustement du chemin optique en espace libre ainsi créé permet d'ajuster en temps réel le recouvrement temporel des enveloppes énergétiques (gaussiennes rouges sur la figure) des impulsions laser. Le contraste des franges est maximum quand le recouvrement est optimal. Mais cette première étape n'est pas suffisante. En effet, quand bien même ces retards temporels relatifs des impulsions sont maintenant compensés, les franges bien contrastées de la figure interférentielle composite « défilent » les unes par rapport aux autres, illustration de la présence de légers déphasages relatifs des oscillations du champ électrique des ondes lumineuses sous leurs enveloppes respectives (sinusoïdes bleues). Et lorsque l'on focalise ce champ composite, la figure de tavelure du centre de la figure 3 est toujours visible. C'est alors qu'entrent en action des étireurs mécaniques de fibres optiques *via* une seconde boucle d'asservissement. Les trains d'impulsions se propagent en effet dans des fibres enroulées autour de cylindres en céramique piézo-électrique qui augmentent légèrement de diamètre lorsque soumis à une tension électrique. ● ● ●



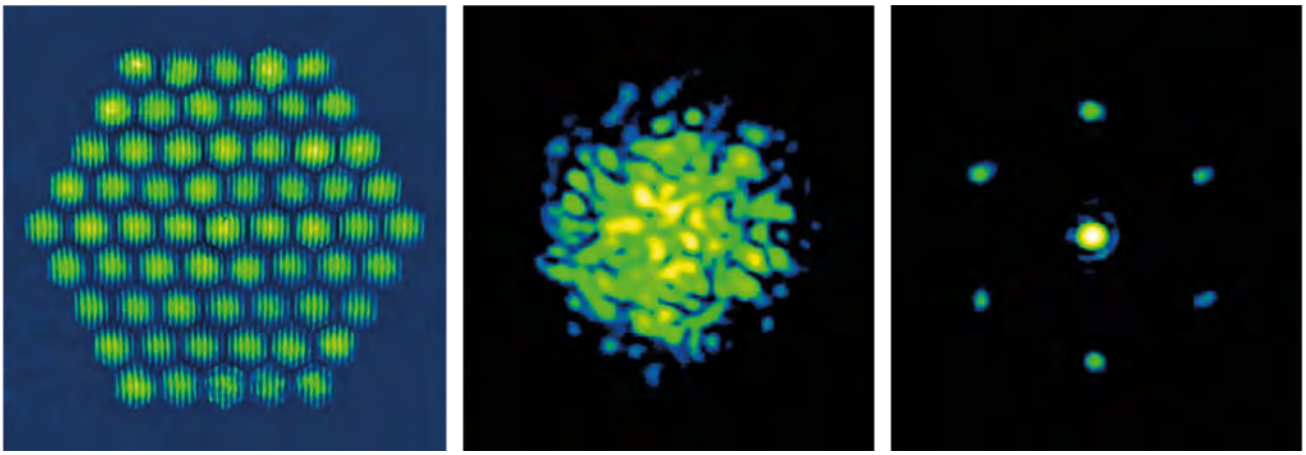


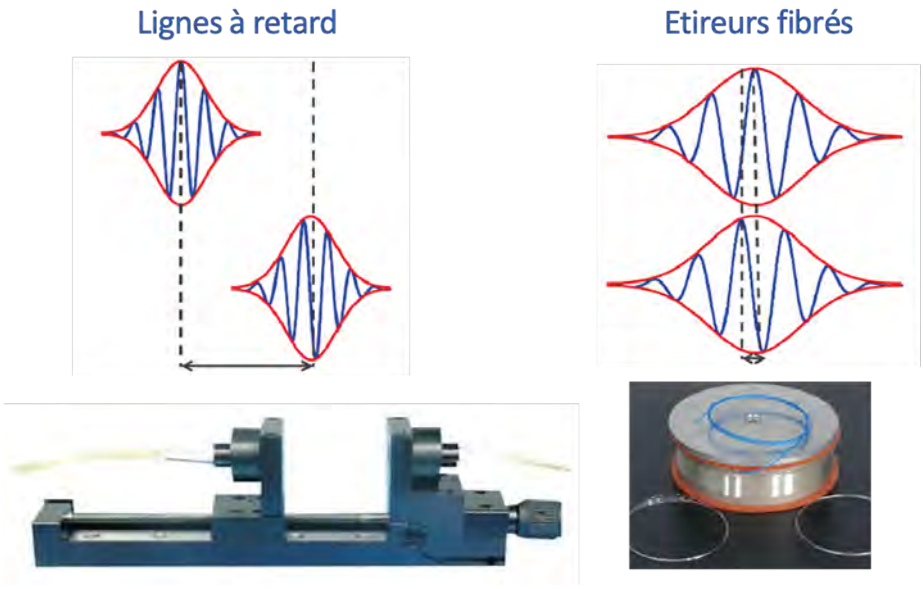
Figure 3. Champ proche interférentiel (gauche) puis champs lointains incohérent (centre) et cohérent (droite).

Ces fibres de transport sont ainsi mécaniquement étirées avec une très grande précision qui permet de rephaser toutes les impulsions et ainsi de figer le champ proche interférentiel (gauche de la figure 3) et d'obtenir une distribution d'énergie en champ lointain telle qu'illustrée sur l'image de droite de cette figure. C'est une simple lentille de focalisation qui permet donc au final d'effectuer une combinaison cohérente des 61 faisceaux du prototype P61. Mais l'on vient de voir que les contraintes mécaniques et temporelles à satisfaire sont très strictes et elles doivent être satisfaites en continu. La notion de « temps réel » évoquée pour la bande passante des deux boucles de contre-réaction présentées signifie que les ajustements (retards et phases) doivent s'effectuer plus rapidement que les phénomènes physiques impliqués. Les principaux, le bruit thermique et les vibrations mécaniques/acoustiques surviennent heureusement sur des échelles de temps relativement lentes, de l'ordre de la milliseconde au maximum. D'autres phénomènes plus rapides (fluctuations du pompage des amplificateurs, effets non-linéaires,...) nécessiteraient une bande passante allant au-delà du kHz mais ils restent secondaires tout en contribuant au fait que l'efficacité globale de combinaison (puissance dans le lobe central du champ lointain de l'image de droite de la figure 3 ramenée à la puissance totale initiale) obtenue expérimentalement est de 50% pour une valeur théorique de 67%.

OPÉRATION EN MODE DIGITAL

L'on voit donc qu'avec ce laser, la mise en forme de la source lumineuse recherchée est intrinsèque à la source elle-même. Il n'est plus nécessaire d'avoir recours à des éléments optiques en aval de celle-ci, si ce n'est une simple lentille de focalisation. A titre d'illustration, considérons la génération de faisceaux laser à moment angulaire orbital (OAM). Ces faisceaux sont porteurs de fronts de phase hélicoïdaux et possèdent une distribution transverse d'énergie toroïdale. De tels faisceaux ont une large gamme d'applications : de la manipulation optique, l'optique quantique et l'imagerie (comme en astronomie ou en caractérisation de l'écoulement des fluides) aux communications optiques et à la cryptographie. Il est également possible d'envisager des applications nécessitant une puissance beaucoup plus élevée, notamment la réduction de l'instabilité des microbunching dans les laser à électrons libres ou la

Figure 4. Dispositifs utilisés sur chacun des 61 canaux du prototype P61 du projet XCAN. À gauche la ligne à retard assurant le recouvrement énergétique des impulsions et à droite les étireurs mécaniques de fibre permettant la mise en coïncidence fine des oscillations du champ laser.



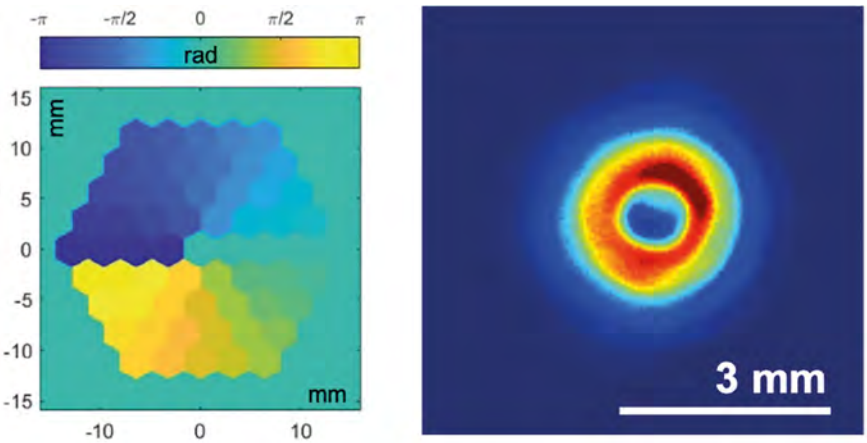


Figure 5. Valeurs des 61 phases appliquées aux 61 canaux (gauche) et champ lointain résultant.

propagation de faisceaux laser ultra-intenses (pour canaliser les éclairs ou détecter les polluants atmosphériques [7]). La figure 5 donne à gauche la distribution des pixels de phase appliqués et à droite le champ lointain résultant. La précision et la diversité des distributions permises augmentent logiquement avec le nombre de faisceaux pixels élémentaires disponibles [8].

CONCLUSION

La mise en œuvre imbriquée des techniques CPA et CBC au sein d'un même prototype laser est une innovation architecturale qui, combinée à l'utilisation de plusieurs douzaines de canaux amplificateurs indépendants, ouvre l'ère des lasers digitaux. Le dernier paramètre manquant à l'appel (le contrôle individuel de la polarisation) achèvera d'offrir le contrôle total du champ laser pixelisé en amont de la combinaison. La génération de faisceaux aiguilles [9] sera par exemple possible. L'équipe XCAN y travaille. Les régimes de puissances/énergie associés (GW crête, kW moyen, mJ) offrent d'ores et déjà un champ applicatif intéressant que nous élargissons *via* l'ajout d'étages de post-compression pour atteindre 10 fs d'une part et l'exploration de techniques de combinaison permettant de s'approcher des 80% d'efficacité [10].

RÉFÉRENCES

[1] M. Antier *et al.*, Photoniques **77**, 41 (2015) http://dx.doi.org/10.1051/photon/20157741

[2] T. H. Maiman, Nature **187**, 4736, 493 (1960)

[3] C. J. Koester and E. Snitzer, Appl. Opt. **3**, 10, 1182 (1964)

[4] D. Strickland and G. Mourou, Opt. Commun. **56**, **3**, 219 (1985)

[5] C. Rouyer *et al.*, Photoniques **112**, 48 (2022) https://doi.org/10.1051/photon/202211248

[6] I. Fsaifes *et al.*, Opt. Express **28**, 14 (2020)

[7] A. Couairon and A. Mysyrowicz, Phys. Rep. **441**, 2, 47 (2007).

[8] M. Veinhard *et al.*, Opt. Lett. **46**, 1, 25 (2021)

[9] L. Turquet at al., Opt. Express **26**, 21 (2018)

[10] T. Zhou *et al.*, Opt. Lett. **43**, 3269 (2018)

ISP SYSTEM

PHOTOMATIQ®
from industrialization to production

Laser
industrialiser la production

La production en série de lasers nécessite des compétences hautement spécialisées. Son automatisation permettra de monter en cadence plus facilement et améliorera le niveau de qualité. Produire en automatique avec répétabilité et à la cadence industrielle est maintenant possible avec Photomatiq®. Photomatiq® est la nouvelle plateforme d'assemblage 3D d'ISP System.

Photomatiq® combine les fonctions de micromanipulation d'optiques et leurs collages de précision. Un poste de vision 3D permet l'assemblage passif de composants à 20µm. Un banc optique configurable permet l'alignement actif des composants avec une sensibilité de 200nm. Elle est équipée de deux robots multiaxes configurables qui peuvent opérer conjointement dans un espace très réduit.

Photonsmart®, le logiciel de supervision assure la production en automatique à partir de gammes d'assemblage du logiciel et permet aux laséristes de créer ou d'optimiser les gammes d'assemblage des modules optiques sans compétence particulière en programmation.

Photomatiq® est flexible, elle permet également la production de PIC (Photonic Integrated Circuit), connecteurs à fibres optiques, Lidar, micro optiques...

www.isp-system.fr

contact@fr-ispgroup.com

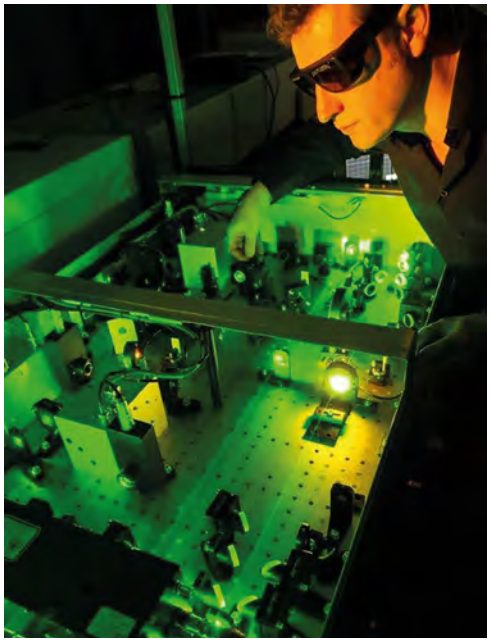
DE L'ULTRA-RAPIDE À L'ULTRA-INTENSE : DE NOUVEAUX CHAMPS D'ÉTUDES

Sandrine DOBOSZ DUFRENOY[1], Thierry RUCHON[1], Henri VINCENTI[1], David BRESTEAU[1], Pascal MONOT[1], Hugo MARROUX[1], Romain GENEAUX[1], Karol HRICOVINI[1,2], Pascal SALIERES[1,*]

[1] Université Paris-Saclay, CEA, CNRS, LIDYL, 91191 Gif-sur-Yvette, France

[2] LPMS, CY Cergy Paris Université, 95031 Cergy-Pontoise, France

*pascal.salieres@cea.fr



© Ph. Stroppa/CEA

Le développement spectaculaire des lasers de puissance ces trente dernières années a ouvert de nouveaux champs d'études : la science attoseconde d'une part, l'optique relativiste d'autre part. Nous illustrons les nouvelles perspectives ouvertes dans divers domaines de la physique, la chimie, la médecine ou la science des matériaux à partir d'études effectuées sur les plateformes ATTOLab et UHI100 du Laboratoire Interactions, Dynamiques et Lasers (LIDYL) du CEA Paris-Saclay.

https://doi.org/10.1051/photon/202311840

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.

Depuis la découverte en 1985 de la technique d'amplification à dérive de fréquence (Chirped Pulse Amplification– D. Strickland et G. Mourou, Prix Nobel 2018), la puissance laser disponible dans les laboratoires n'a cessé de croître, délivrée dans des impulsions de plus en plus courtes et de mieux en mieux maîtrisées. Il est possible aujourd'hui de façonner les faisceaux à l'aide de « miroirs plasmas » ou de contrôler le champ électrique des impulsions à l'échelle du cycle optique. Nous exploitons au LIDYL ces deux aspects, brièveté et puissance, pour développer deux champs exploratoires de la physique: la science attoseconde et l'optique relativiste.

L'ULTRA-RAPIDE: LA SCIENCE ATTOSECONDE

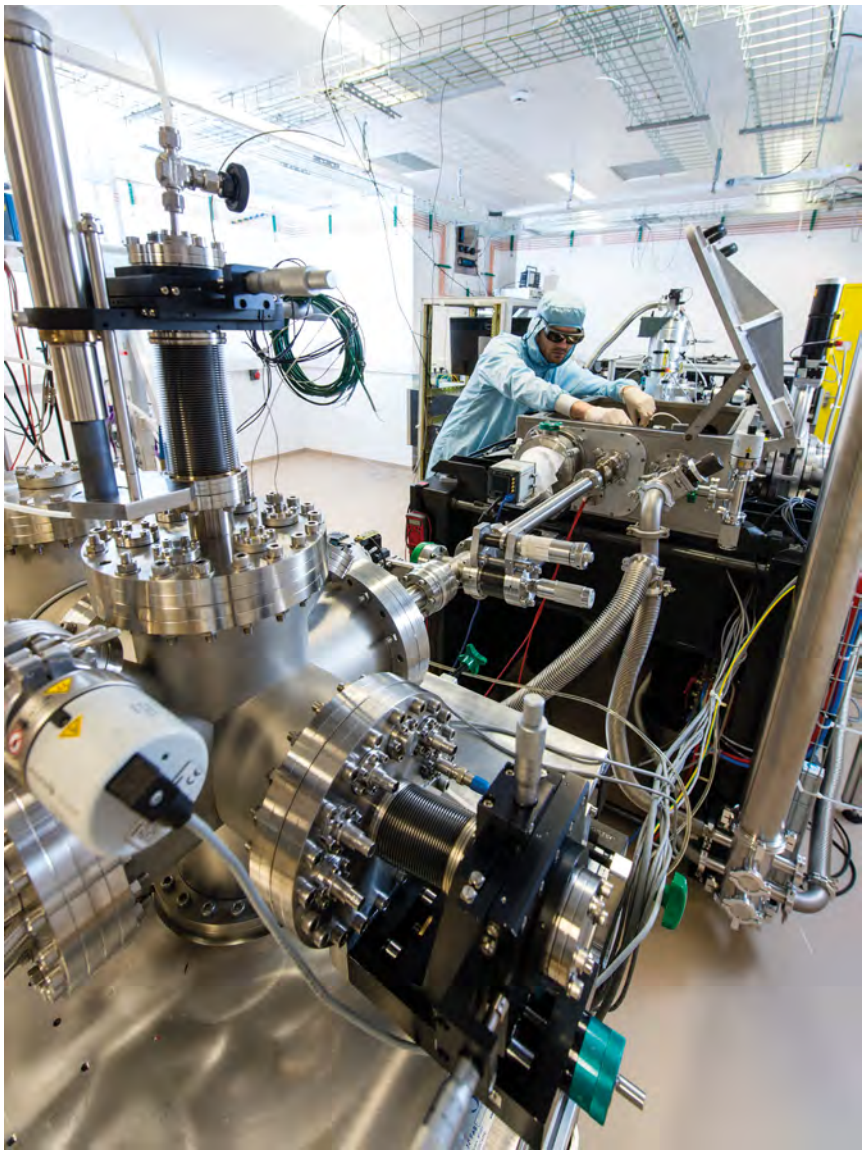
L'avènement des lasers aux impulsions intenses et brèves, entrant dans le régime femtoseconde, a conduit à la découverte d'un régime non perturbatif de l'interaction laser-matière, posant les bases de l'optique non linéaire extrême. En 1987 fut observée au CEA-Saclay la génération des harmoniques d'ordre élevé d'un

laser infrarouge intense focalisé dans un gaz atomique, c'est-à-dire l'émission des fréquences multiples de la fréquence laser, convertissant le rayonnement de façon cohérente dans l'extrême ultraviolet (XUV) tout en comprimant sa durée. En 2001, il était démontré que ce processus fournissait une source d'impulsions de durée attoseconde (1 as =10^{-18} s), ouvrant un nouveau champ d'études, à l'échelle de temps naturelle des mouvements électroniques dans la matière [1]. Le développement fulgurant du domaine a conduit à la construction de nombreuses infrastructures attosecondes dans le monde, la France disposant de plusieurs plateformes de pointe hébergées par 4 laboratoires: le CELIA à Bordeaux, l'ILM à Lyon, le LOA à Palaiseau et le LIDYL à Saclay (figure 1).

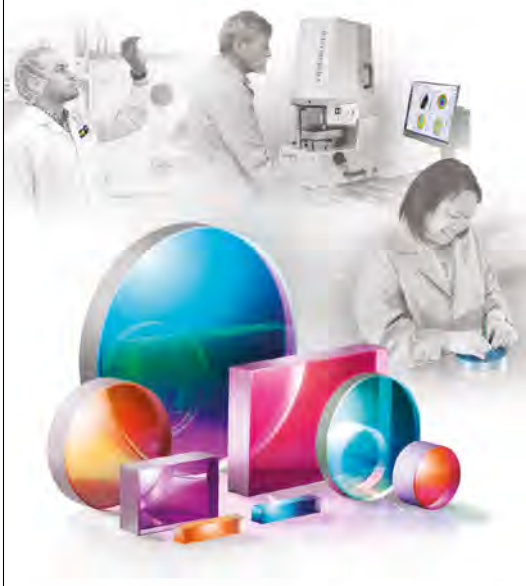
Des sources XUV attosecondes toujours mieux contrôlées

Longtemps limitée à la génération de faisceaux XUV quasi-gaussiens polarisés linéairement et au front d'onde sphérique, la physique attoseconde s'est enrichie ces dernières années ●●●

Figure 1. Ligne de lumière attoseconde de la plateforme ATTOLab (CEA, CNRS, Université Paris-Saclay), installée sur le laser FAB1 (laser Titane:Saphir délivrant des impulsions de 15 mJ, 25 fs à 1 kHz). © Ph. Stroppa/CEA.



L'OPTIQUE EST NOTRE AVENIR



OPTIQUES LASER d'Edmund Optics®

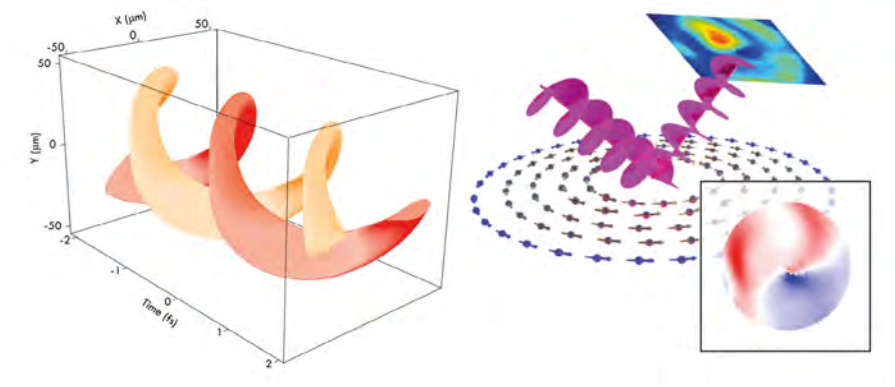
Edmund Optics® conçoit et fabrique une gamme complète de composants optiques adaptés aux applications laser.

✔ Un grand inventaire en stock
✔ Métrologie de pointe
✔ Capacités de traitement avancées
✔ Fabrication sur mesure disponible

Pour en savoir plus sur nos optiques laser, rendez-vous sur:
www.edmundoptics.fr/LO

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

Edmund optics | worldwide



de nombreuses possibilités de contrôle. Il est d'abord possible d'agir sur les conditions de génération, en structurant le front d'onde du laser fondamental, sa polarisation, ou en superposant plusieurs faisceaux portant des propriétés différentes. Par exemple, l'insertion d'une lame de phase en spirale communique un moment angulaire orbital au laser fondamental qui est transféré aux faisceaux XUV (figure 2), produisant des impulsions à front d'onde hélicoïdal, avec des applications prometteuses pour l'étude d'espèces chirales ou de structures magnétiques. En utilisant plusieurs impulsions laser fondamentales portant des moments angulaires orbitaux différents, il est même possible d'ajuster à loisir la valeur du moment orbital de l'impulsion XUV. Nous disposons également, en utilisant deux impulsions portant un moment angulaire de spin, de sources XUV attosecondes polarisées circulairement, adaptées à l'étude de dichroïsmes circulaires magnétiques.

Il est ensuite possible d'effectuer un contrôle 'aval' des propriétés de la source attoseconde grâce à de nouvelles optiques XUV. Ce domaine spectral, notoirement difficile, a récemment connu des progrès considérables. Des miroirs multicouches apériodiques à trois composants (calculés et déposés au Laboratoire Charles Fabry) permettent aujourd'hui d'ajuster le spectre d'une source attoseconde tout en préservant sa durée. Il est également possible, au prix de pertes contrôlées, de disposer de l'équivalent d'une lame

Figure 2. (Gauche) Structure spatio-temporelle en double hélice du champ électrique XUV issu de la génération d'harmoniques d'ordre élevé avec un faisceau portant un moment angulaire orbital. L'épaisseur de chaque isocontour a une durée de l'ordre de 200 as. (Droite) Exemple d'utilisation d'un faisceau XUV portant un moment angulaire orbital pour la détection du sens de circulation d'un vortex magnétique. En haut est représentée l'image de l'intensité directe après réflexion sur le vortex magnétique et en bas, la différence des deux images obtenues avec deux vortex s'enroulant dans des sens opposés.

Figure 3. Alignement du dispositif de correction du profil temporel des impulsions lumineuses issues de la chaine laser UHI100 (CEA/LIDYL). Le caisson comprend en particulier un jeu de deux miroirs plasmas. L'installation expérimentale exploite le laser de classe 100 TW (énergie de 2,5 J et 25 fs de durée d'impulsion) pour étudier l'interaction laser-plasma à Ultra-Haute Intensité (UHI). © L. Godart/CEA

quart d'onde par réflexion. De nombreuses applications deviennent possibles grâce à cette nouvelle flexibilité des sources attosecondes.

Physico-chimie attoseconde

Dans les années 90, les développements de la femtochimie ont révélé qu'à cette échelle de temps, les mouvements atomiques ne peuvent être considérés indépendants de ceux des électrons, questionnant l'approximation de Born-Oppenheimer, l'un des piliers de la chimie. A l'échelle attoseconde au contraire, les noyaux atomiques sont réellement figés et les électrons seuls en mouvement. Ainsi, en couplant une source attoseconde avec une détection résolue angulairement, il est possible de reconstruire le film 3D de la photoémission d'un électron de valence d'un gaz atomique ou moléculaire [2]. Les sources XUV sont aussi capables d'exciter les couches électroniques internes de la matière. En excitant ces niveaux de cœur, une véritable cascade d'électrons est déclenchée (processus Auger). L'étude temporelle de ces processus est à la frontière de nos capacités expérimentales mais est cruciale pour comprendre des mécanismes chimiques fondamentaux, tels que ceux actifs en radiothérapie. Pour cela, des développements sont en cours pour amener la spectroscopie attoseconde vers des échantillons liquides se rapprochant des conditions du vivant. La prochaine étape sera de passer de l'observation au contrôle attoseconde des électrons de manière à contrôler la réactivité chimique.

La science attoseconde pour décortiquer les propriétés des matériaux

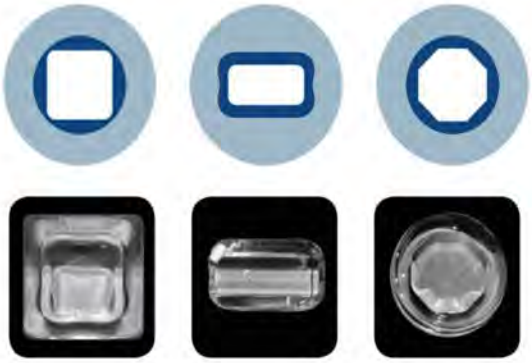
La compréhension et la manipulation des mouvements des électrons dans les solides est également centrale pour la technologie moderne, par exemple pour l'électronique basée sur les semiconducteurs, ou pour les dispositifs photovoltaïques.

Deux techniques attosecondes, disponibles à ATTOLab, répondent à ces défis. La spectroscopie de photoémission mesure l'énergie, l'angle d'émission, et le spin d'électrons arrachés au solide, ce qui permet de reconstruire sa structure de bande résolue en spin en fonction du temps [3]. L'absorption transitoire, spectroscopie purement optique, consiste à exciter un solide avec une impulsion visible, et à mesurer son absorption ou sa réflectivité avec une impulsion attoseconde XUV. Comme dans les gaz, ce rayonnement permet d'exciter sélectivement les électrons de cœur de certains éléments. Ainsi, des phénomènes de transfert de charge entre différents sites ou entre différentes couches de matériaux hétérogènes deviennent observables.

On peut donc suivre la répartition de l'énergie déposée dans un solide entre ses différents degrés de libertés: courants électroniques, mouvement des atomes, orientation des spins, etc. C'est précisément la manière dont ces degrés de libertés interagissent qui confère des propriétés fascinantes aux matériaux: supraconductivité, ferroélectricité, ou ordre magnétique. La spectroscopie attoseconde •••

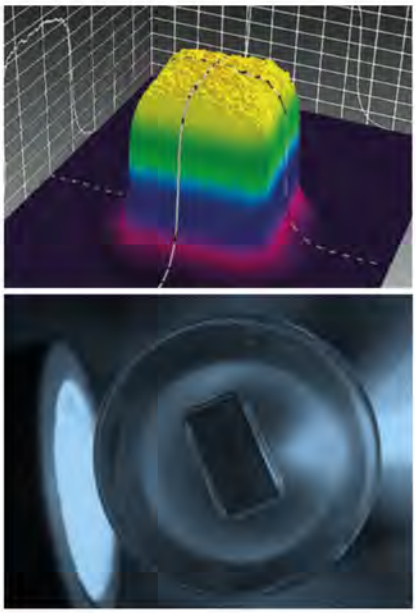
OBS FIBER
OPTICAL FIBER EXPERT
Des fibres optiques innovantes ...
A chaque étape de votre processus

Fibre Silice à cœur non circulaire



OBS FIBER en partenariat avec CeramOptec vous propose **deux nouvelles gammes** de fibres optiques spéciales en silice à **cœur non circulaire**, fonctionnant de l'UV au visible (190nm - 1200nm) et du visible au proche infrarouge (300nm - 2400nm).

Les différentes géométries de cœurs assurent un mélange très efficace des modes permettant une excellente distribution homogénéisée de la puissance de sortie avec un profil d'intensité de type *top-hat*. Avec une résistance élevée aux dommages lasers, ces fibres multimodes sont donc idéales pour des applications de mise en forme de faisceaux, d'astronomie, avec des détecteurs carrés et bien d'autres encore.



OBS FIBER
OPTICAL FIBER EXPERT
1 rue de Terre Neuve | 91940 Les Ulis | France
Tél.: ++33 1 60 92 41 22 | contact@obs-fiber.fr
www.obs-fiber.fr

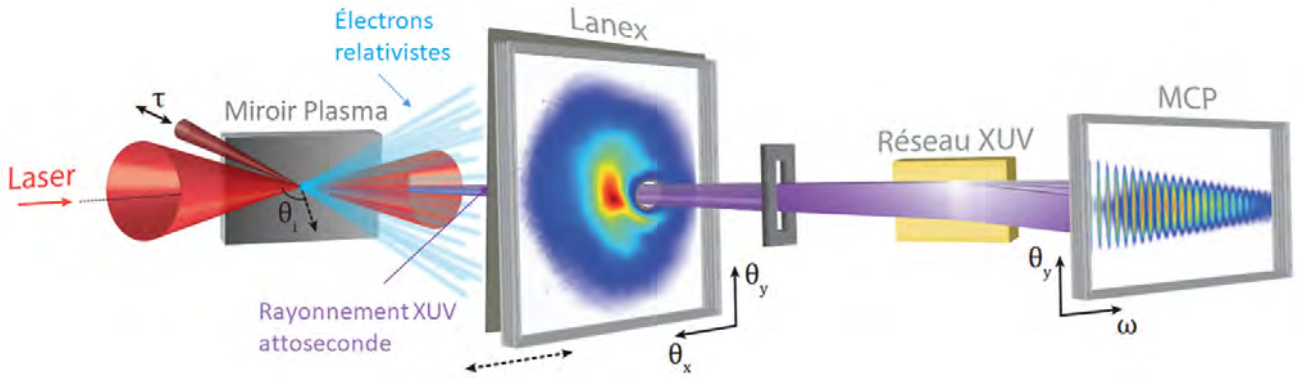


Figure 4. Étude des propriétés des électrons relativistes et du rayonnement XUV attoseconde émis dans la direction du laser ultra-intense réfléchi sur un miroir plasma après mise en forme de la surface impactée par l'impulsion laser en fonction de l'état du gradient produit sur ce miroir. Le gradient de densité, de longueur comprise entre la longueur d'onde laser et quelques dizaines de nanomètres, est produit et contrôlé *via* une impulsion lumineuse annexe retardée d'un délai (τ) et focalisée en face avant du miroir. On observe, en fonction des propriétés du gradient de densité produit, des faisceaux d'électrons et de rayonnement XUV attoseconde aux propriétés différentes. Le spectre de l'émission XUV est analysé à travers un spectromètre et le profil spatial du faisceau d'électrons sur un écran LANEX.

contribue à « démêler » ces états complexes de la matière si utiles à la technologie moderne, voire à en modifier les propriétés de manière quasi-instantanée. La perspective est d'un jour utiliser la lumière pour contrôler des dispositifs à des vitesses sans précédent, ou synthétiser des états de la matière encore inexistants.

L'ULTRA-INTENSE: L'OPTIQUE RELATIVISTE

Focalisés sur des surfaces de l'ordre du micromètre, des lasers encore plus puissants ont permis de dépasser l'éclairement de seuil du régime dit « relativiste », pour lequel les électrons acquièrent une énergie cinétique supérieure à leur énergie au repos. Ainsi pour des éclairements supérieurs à 10^{18} W/cm^2, la matière devient plasma et des particules chargées (électrons/ions) peuvent être propulsées à des vitesses relativistes en quelques attosecondes. La physique associée à ces nouveaux régimes, appelée physique des Ultra-Hautes Intensités (UHI), est ultra-relativiste, fortement non-linéaire et hors-équilibre, ce qui rend son étude particulièrement importante d'un point de vue fondamental. En particulier, sur la plateforme UHI100 (figure 3), dotée d'un laser de classe 100 TW, il est possible d'étudier les mécanismes fondamentaux intervenant lors du couplage du laser avec une cible pour des éclairements compris entre 10^{18} et 10^{20} W/cm^2. Des expériences, couplées à des simulations numériques sur super-calculateurs, permettent d'étudier l'interaction laser-plasma à ces intensités, en particulier la réponse de la matière solide qui forme des miroirs plasmas, mais aussi d'exploiter cette interaction pour accélérer le développement de nouvelles sources de particules relativistes et de lumière XUV attoseconde.

Les miroirs plasmas

De façon schématique, un miroir plasma est un plasma dense créé à la surface d'une cible initialement solide irradiée par un laser intense ultracourt [4]. Le plasma de densité élevée à la surface de la cible se comporte comme un miroir et réfléchit efficacement l'impulsion laser incidente tout en préservant ses qualités spatiales. Si la cible est à l'origine transparente, il peut être employé comme commutateur ultra-rapide pour isoler l'impulsion principale du bruit lumineux qui la précède. Il permet également de produire de manière synchronisée des sources de particules relativistes (électrons/ions) et des sources harmoniques XUV très intenses et de durée attoseconde, *via* un processus très différent de celui utilisé en milieu dilué, basé sur un effet Doppler alternatif [5] (figure 4). Très récemment, des expériences menées sur UHI100 - couplées à des simulations numériques exascales – ont montré que les miroirs plasmas peuvent comprimer spatialement et temporellement une impulsion laser et accroître ainsi son intensité de plusieurs ordres de grandeur. Une telle méthode devrait offrir l'opportunité unique de sonder de nouveaux régimes d'interaction lumière-matière dominés par l'électrodynamique quantique (QED) en champ fort, dont l'exploration s'avère cruciale pour valider la théorie QED dans des régimes non-perturbatifs restés jusqu'à présent hors d'atteinte des grands collisionneurs de particules.

Les accélérateurs laser-plasma

Une impulsion laser issue de l'installation UHI100 et focalisée dans un jet de gaz ne sera pas réfléchie par le plasma qu'elle forme, comme pour une cible solide, mais peut se propager et sous certaines conditions exciter une onde de plasma. Une

partie des électrons sont alors piégés et accélérés progressivement par l'onde de plasma, à l'image du surfeur qui profite de la vague pour gagner de la vitesse. On sait produire aujourd'hui par laser des faisceaux d'électrons avec une énergie de quelques MeV jusqu'à quelques GeV sur des distances centimétriques, bien plus réduites qu'avec des accélérateurs conventionnels (quelques dizaines à centaines de mètres). Les sources d'électrons issues de ces nouveaux accélérateurs ultra compacts possèdent des propriétés remarquables. En particulier, elles sont ultra-courtes (10 fs), ce qui rend possible leur utilisation pour sonder des processus ultra-rapides dans la matière. Elles présentent un intérêt grandissant dans de nombreux domaines aussi variés que la médecine (radiothérapie, imagerie, diagnostics ...), la chimie (radiolyse, étude de surface, réactions chimiques, catalyse, structure moléculaire...), la physique (diagnostics pour la physique des plasmas, détecteurs, etc...), la science des matériaux (radiographie, diffraction électronique) ou encore le domaine de la sûreté (contrôle de colis, frontière ...). Ces accélérateurs souffrent en revanche toujours de limitations importantes que les équipes du LIDYL cherchent activement à lever. L'une d'elles réside dans la faible charge à haute énergie, ce qui limite actuellement leur utilisation dans certaines applications notamment pour la radiothérapie FLASH. Il s'agit d'une approche thérapeutique anti-cancéreuse extrêmement prometteuse, qui pourrait tirer bénéfice des faisceaux ultra brefs générés par laser pour détruire efficacement les tumeurs tout en préservant davantage les tissus sains qu'avec une irradiation conventionnelle. Pour résoudre cette limitation, le LIDYL a développé, en collaboration avec le LOA, un nouvel injecteur 'miroir plasma', conjuguant le meilleur de l'interaction sur cible solide et cible gazeuse, permettant d'injecter de hautes charges dans une onde de plasma créée dans un gaz, en conservant une excellente qualité de faisceau. Ce nouveau concept, breveté et validé par des simulations avancées, sera mis en place très prochainement sur la plateforme UHI100.

CONCLUSION

Le développement des lasers de puissance a permis d'accéder à de nouveaux régimes d'interaction, conduisant à la production de sources de lumière XUV attoseconde et de particules relativistes, avec une grande diversité d'applications en physique, chimie, médecine ou science des matériaux.

Longtemps chasse gardée exclusive des lasers Titane:Saphir, la science attoseconde voit l'émergence de technologies alternatives, notamment basées sur les milieux à gain Ytterbium, qui promettent l'augmentation au moins d'un facteur 10 de la cadence/puissance moyenne, rendant possible de nouvelles applications.

Côté optique relativiste, le développement de lasers ultra brefs de plus en plus puissants dans les années à venir devrait permettre d'explorer des territoires fascinants, pour lesquels les théories existent mais où tout reste encore à mesurer. Les miroirs plasmas constitueront certainement un outil de choix pour augmenter l'éclairement, comme le montrent déjà les simulations numériques exploratoires menées au LIDYL.

RÉFÉRENCES

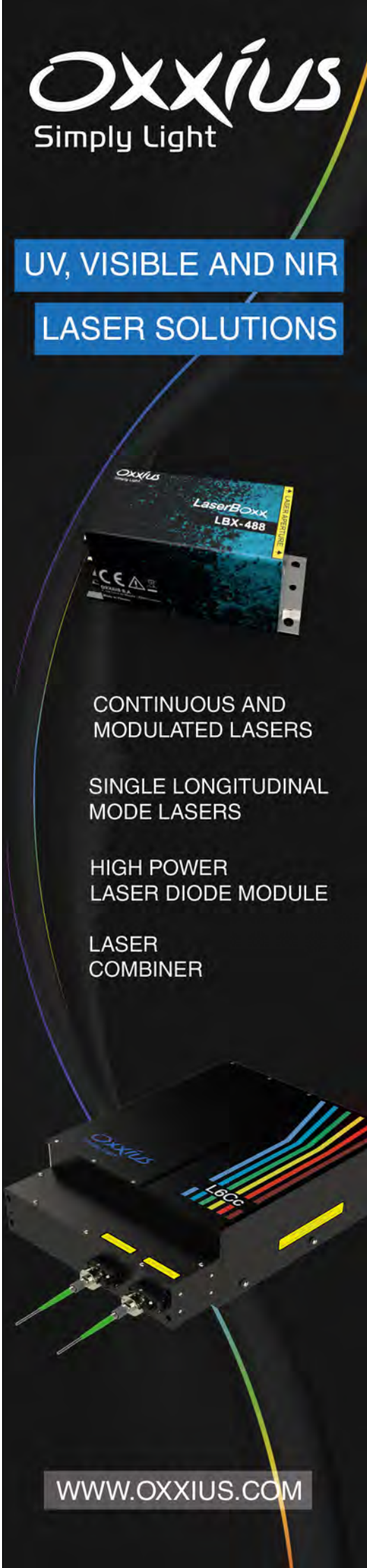
[1] P. Salières, T. Ruchon et B. Carré , Photoniques **48**, 38 (2010)

[2] A. Autuori *et al.*, Sci. Adv. **8**, eabl7594 (2022)

[3] M. Fanciulli *et al.*, Phys. Rev. Res. **2**, 013261 (2020)

[4] C. Thaury *et al.*, Nat. Phys. **3**, 424 (2007)

[5] L. Chopineau *et al.*, Nat. Phys. **17**, 968 (2021)



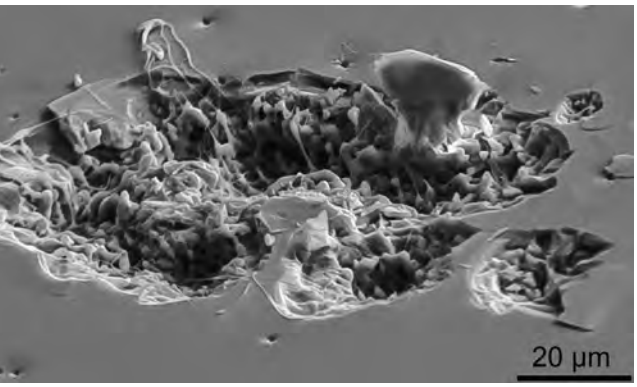
L'ENDOMMAGEMENT LASER SUR LES LASERS DE PUISSANCE

Laurent GALLAIS[1,*], Laurent LAMAIGNÈRE[2,+]

[1] Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, 13013 Marseille, France

[2] CEA CESTA, F-33116 Le Barp, France

***laurent.gallais@fresnel.fr - +laurent.lamaignere@cea.fr**



https://doi.org/10.1051/photon/202311846

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.

Lorsqu'un fort flux laser traverse ou est réfléchi sur un composant optique, le couplage du rayonnement laser dans la matière (par absorption intrinsèque, par absorption sur des défauts locaux, ou par absorption non-linéaire) peut conduire à des effets irréversibles altérant la fonction optique du composant et pouvant même le rendre inutilisable. Ces modifications permanentes du matériau sont définies comme des « endommagements laser ». C'est un verrou technologique majeur à l'essor des sources lasers à haute puissance ou haute énergie, puisque qu'il limite la densité de puissance ou d'énergie accessible, affecte la durée de vie des composants optiques, ainsi que le coût de maintenance des chaînes laser.

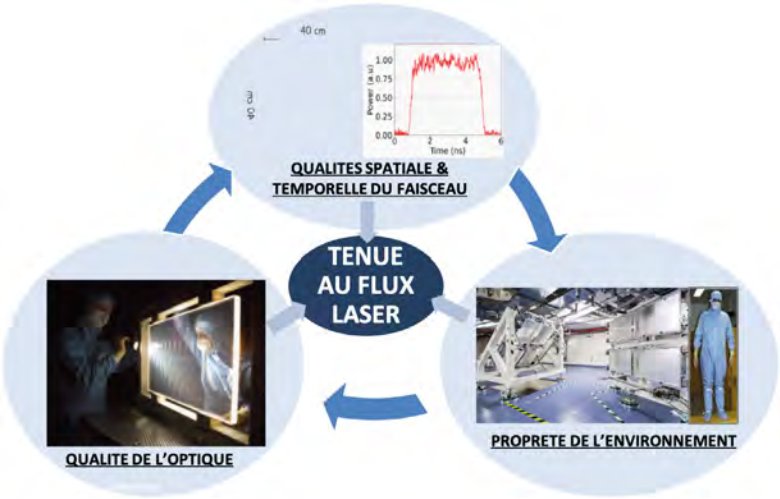
Le développement de lasers énergétiques et puissants s'appuie sur de nombreuses innovations technologiques depuis les travaux initiaux de Maiman. L'évolution des procédés de fabrication des optiques a permis de grandement réduire le risque d'endommagement laser sur les installations laser de puissance comme le LMJ, APOLLON, PETAL.... En particulier, c'est l'amélioration des procédés de polissage, de traitement chimique et de dépôt de couches minces des composants optiques qui a permis de fortement réduire la présence de défauts pouvant mener à leur endommagement par laser. Toutefois, la puissance peut être limitée sur ces installations à cause de la problématique d'endommagement préférentiellement sur les composants de fin de chaine pour lesquels les densités de puissance sont les plus importantes. Ces dommages lasers ont notamment un impact sur les caractéristiques optiques du composant et peuvent dégrader ses performances, le rendre inutilisable et au final affecter les performances globales de l'installation (en termes de puissance et de qualité du faisceau). Outre les optiques, la qualité des faisceaux est tout aussi fondamentale car les

modulations spatiales et temporelles vont conduire à des surintensités dans les faisceaux, néfastes pour l'endommagement des optiques en aval. Enfin la propreté de l'optique et de l'environnement est un aspect essentiel car les poussières, les contaminations moléculaires et particulaires sont des sources d'endommagement. In fine, la problématique de l'endommagement peut être vue comme un triptyque, illustré en Fig.1, impliquant la qualité des optiques, des faisceaux et de l'environnement. Ces facteurs d'endommagement peuvent ainsi conduire à l'amorçage de dommages de taille micrométrique, finalement petite devant la dimension centimétrique des optiques. Mais ces dommages peuvent ensuite croitre lors des illuminations successives correspondant à la phase de croissance, ce phénomène est illustré dans l'encart 1. Enfin, la propagation du faisceau est modulée par le dommage, conduisant à des surintensifications locales du faisceau dépendant des dimensions et de la forme du dommage, qui reportées sur les optiques en aval peuvent créer à leur tour un endommagement par effet fratricide. La phénoménologie de l'endommagement laser peut ainsi se synthétiser en une phase d'amorçage du dommage, suivie d'une phase de croissance couplée à un endommagement potentiel sur des composants en aval par propagation.

LES MÉCANISMES PHYSIQUES DU COUPLAGE LASER/MATIÈRE

L'endommagement laser résulte du couplage et du transfert de l'énergie laser dans le matériau qui peut avoir pour conséquences différentes dégradations physiques du matériau : fusion, vaporisation, fracturation, éjection de matière... Ces mécanismes sont complexes et pour les décrire de façon détaillée, il est nécessaire de faire appel à des codes de calcul qui peuvent être très complexes. Par exemple l'amorçage d'un dommage par un défaut sur une optique (une particule de contaminant, une rayure) nécessite de traiter le dépôt d'énergie dans le défaut, les transferts de chaleur par conduction et rayonnement, l'augmentation de température, l'ionisation dans la matrice environnante et ses possibles conséquences en termes d'augmentation de l'absorption, la formation d'un plasma, la propagation d'ondes de chocs, les changements de phases... Néanmoins si l'on se concentre sur le mécanisme d'amorçage du dommage (absorption/transferts d'énergie) sans décrire de façon détaillée le processus de dégradation, il est possible de dégager 2 ●●●

Figure 1. Le triptyque de l'endommagement laser sur une chaine laser de puissance

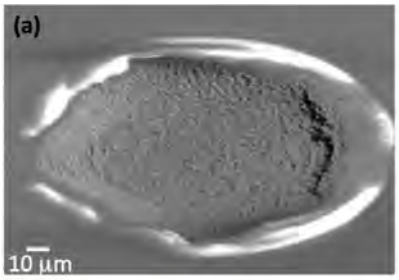


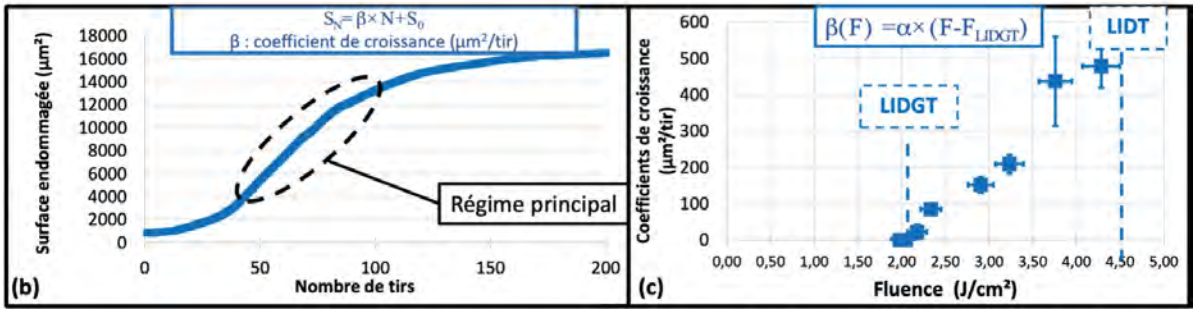
types de mécanismes qui gouvernent l'amorçage, que l'on peut qualifier de "photo-électroniques" et "photo-thermiques". Ces 2 mécanismes peuvent être différenciés suivant les caractéristiques temporelles de l'impulsion. Les effets thermiques interviennent pour de longues durées d'interaction alors que les effets photo-électroniques correspondent aux courtes durées d'interaction. Dans le cas de matériaux diélectriques, la limite entre ces 2 domaines se situe entre la ps et la centaine de ps, ce qui correspond aux temps caractéristiques des échanges entre les électrons photo-excités et les atomes constitutifs du matériau.

Lors de l'illumination par un rayonnement laser de forte densité de puissance, une partie de la puissance incidente est absorbée par le matériau et restituée sous forme de chaleur. Cette interaction dépend à la fois des paramètres du faisceau laser (durée d'impulsion, taux de répétition, taille du faisceau...) et du matériau. L'absorption de la puissance du rayonnement laser va provoquer une augmentation de la température dans le milieu absorbant et par

LA CROISSANCE DES DOMMAGES

Lors de la phase d'amorçage, le dommage est de taille micrométrique. Lors des illuminations successives, il peut croitre et atteindre des tailles millimétriques. L'évolution du dommage peut être mesurée en laboratoire avec des faisceaux suffisamment grands et avec un suivi de l'évolution du dommage au moyen d'un microscope permettant de mesurer ses dimensions au cours de la phase de croissance. La photographie (a), obtenue au moyen d'un microscope électronique à balayage, montre les délaminations des couches d'un miroir diélectrique lors de la croissance. La courbe d'évolution des dimensions du dommage en fonction des illuminations successives permet de connaître la dynamique de croissance qui dépend des matériaux et des paramètres laser. Elle peut être linéaire dans le cas de miroirs diélectriques comme reporté dans le graphe (b) pour le régime principal, voire exponentielle pour des verres. La croissance est un phénomène à seuil, c'est-à-dire que le dépôt d'énergie doit être suffisant pour conduire à une évolution du dommage : en-dessous du seuil, le dommage n'évolue pas et reste stable. Au-dessus du seuil, la dynamique est d'autant plus forte que le dépôt d'énergie est important, le coefficient de croissance (β) dans les relations reportées dans les graphes (b) et (c) augmente avec l'éclairement comme illustré sur le graphe (c). Ainsi un seuil de croissance est estimé (LIDGT pour Laser-Induced Damage Growth Threshold) en-dessous duquel le laser peut continuer à fonctionner sans évolution du dommage et au-dessus duquel le coefficient de croissance, qui rend compte de l'évolution du dommage, permet d'estimer ce qui est communément appeler la durée de vie de l'optique, cela permet également d'ajuster le profil d'emploi du laser.





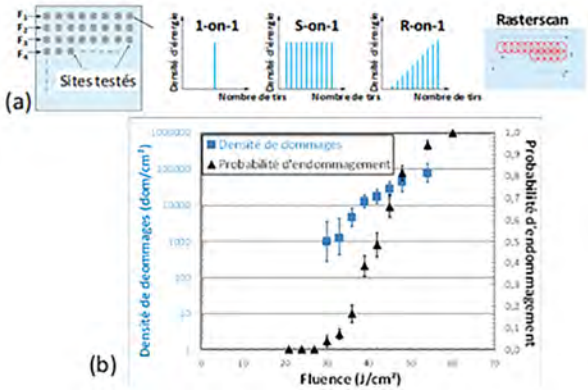


Figure 2. (a) Description des procédures de tests permettant d'estimer (b) des probabilités et des densités de dommages. Celles-ci sont liées par une relation simple [3,4], ainsi les résultats de la figure (b) sont issus d'un même jeu de données.

transfert de chaleur, dans les autres milieux (empilement de couches minces par exemple). Cette augmentation de la température s'arrête lorsque les pertes (conduction, rayonnement) compensent l'apport induit par le rayonnement laser. L'augmentation de la température va donner lieu à de nombreux effets : expansion thermique, contraintes, biréfringence, effets non-linéaires, emballement thermique (augmentation de l'absorption avec la température), fissuration, fusion, vaporisation…L'endommagement du matériau intervient alors du fait d'un ou plusieurs de ces effets.

Lors de l'interaction d'une impulsion intense (forte puissance crête) dans un matériau diélectrique transparent à la longueur d'onde d'irradiation, des mécanismes d'absorption de nature non-linéaire et intrinsèques au matériau peuvent intervenir (photo-ionisation). Ces processus vont entrainer la génération d'électrons libres dans le matériau dont la densité va croître durant l'impulsion. Le matériau initialement transparent peut alors devenir fortement absorbant et acquérir progressivement les caractéristiques optiques d'un métal. Localement, la matière se trouve ainsi sous la forme d'un plasma qui va interagir avec l'impulsion laser. L'énergie déposée dans ce plasma va être transférée au matériau, pendant et après l'impulsion laser par relaxation, ce qui peut conduire à un endommagement si cette énergie dépasse un certain seuil.

LA MÉTROLOGIE DE L'ENDOMMAGEMENT LASER

Le principe général des mesures de la tenue au flux laser des composants optiques consiste à illuminer le matériau à différents niveaux d'énergie ou de puissance et à détecter à chaque tir la présence ou non d'un dommage. On peut ensuite tracer la probabilité d'endommagement, ou la densité de dommages sur l'optique en fonction de la densité d'énergie ou de puissance. Pour effectuer ces tests, différentes procédures existent, dont les principes sont définis par •••

Mesure de faisceau laser pour la production automatisée

Les systèmes de mesure Ophir pour les applications industrielles offrent des boitiers robustes et des interfaces de communication ProfiNET, Ethernet-IP et RS-232.

Helios Plus –
Puissance-mètre laser compact

- Mesure jusqu'à 12 kW en quelques secondes
- Simple à intégrer
- Fonctionne sans refroidissement
- Pour les longueurs d'onde NIR, vert et bleu

BeamWatch Integrated –
Diagnostic complet de faisceau laser

- Mesure sans contact de la position et du diamètre du foyer
- Image en temps réel de la caustique du laser
- Mesure complète en moins d'une seconde

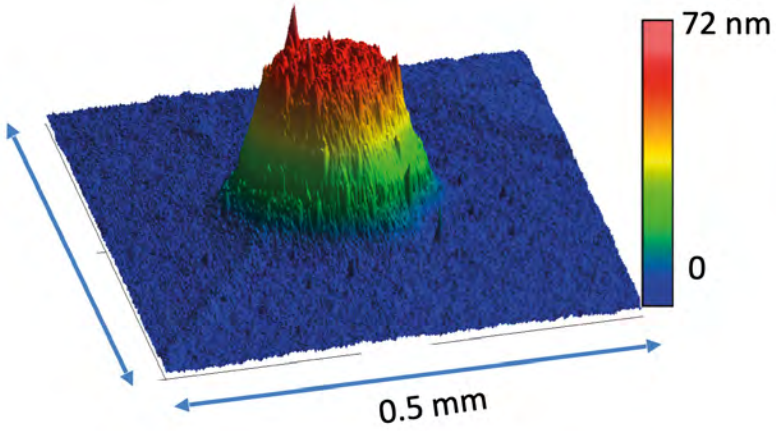
Appelez-nous **+33 6 01 01 27 32**
www.ophiropt.com

mks | Ophir®

les normes internationales [1]. Deux types principaux de tests de tenue au flux peuvent être distingués : la tenue à un tir laser et la tenue à une série de tirs laser pour tenir compte d'éventuels effets de fatigue, et également lors d'illuminations à bas flux pour prendre en compte des effets de contamination induite par laser (LIC en anglais) expliqués dans l'encart 2. Les mesures sont généralement réalisées en laboratoires dans lesquels des dispositifs de mesure dédiés sont mis en œuvre. En effet, il est nécessaire de connaître précisément les principaux paramètres de l'impulsion laser tels que la surface du faisceau, son énergie et la durée de l'impulsion pour déterminer les densités d'énergie ou de puissance correspondant à l'illumination laser car l'endommagement dépend fortement de ces paramètres. Il est donc important de bien les mesurer et d'utiliser des valeurs normalisées pour effectuer des comparaisons ou des mises à l'échelle. C'est ainsi qu'un faisceau est décrit par sa surface effective, sa durée effective et son énergie [2]. Pour la détection des dommages, les techniques les plus couramment utilisées *in-situ* sont la microscopie et la diffusion qui sont complétées par des observations fines réalisées port-mortem en microscopie électronique à balayage. La caractérisation d'un composant à partir d'une mesure statistique est généralement nécessaire du fait de son inhomogénéité et de la répartition aléatoire des précurseurs à l'endommagement, qu'elle soit locale ou parce qu'une distribution de défauts caractérise le composant. Ainsi des densités de dommages sont estimées à partir du balayage d'une surface donnée d'un composant, procédure communément appelée rasterscan, décrite dans la Fig. 2, qui est pertinente pour la mesure d'optiques de bonne qualité avec de très rares défauts, balayage réalisé à la valeur d'éclairement à laquelle le composant optique est utilisé. Une estimation de la tenue au flux laser (TFL) du composant est aussi possible avec des procédures de type 1on1, Son1 et Ron1 (voir Fig. 2) qui donnent une information sur la probabilité d'endommagement du composant. Des traitements mathématiques tenant compte de la distribution de la population de défauts permettent de faire la correspondance entre les densités de dommages et les probabilités d'endommagement estimées par les différentes procédures. Plus de précisions sont données dans les références [3] et [4].

LA CONTAMINATION INDUITE PAR LASER OU LIC

Généralement les systèmes laser doivent opérer à un point de fonctionnement permettant une large marge de sécurité pour éviter d'endommager les optiques. Cependant, si des composants peuvent démontrer une tenue au flux laser élevée, leur fiabilité à long terme peut être insatisfaisante même



s'ils sont exploités sous cette limite. Un effet particulièrement néfaste est l'interaction entre le faisceau laser, les composés volatils de l'atmosphère ambiante et la surface optique qui peuvent déclencher la formation, sur la surface exposée au flux, de couches nanométriques hautement absorbantes ou diffusantes. Ce processus de dépôt indésirable, appelé contamination induite par laser (Laser-Induced Contamination, LIC), peut être responsable d'une perte des performances optiques accélérée (dégradation de la réflexion / transmission, de la qualité du front d'onde) et peut finalement aboutir à un dommage laser des composants optiques. Cet effet s'avère extrêmement critique pour des lasers UV caractérisés par le rayonnement de photons très énergétiques. Les effets LIC sont aussi particulièrement préjudiciables dans le régime d'impulsions courtes pour lesquels des processus d'absorption multi-photonique peuvent être activés.

DES COMPOSANTS OPTIQUES RÉSISTANT À DE FORTS FLUX LASER

La production de composants optiques résistant aux forts flux laser est bien entendu un enjeu majeur. Compte tenu des éléments discutés, il existe cependant des limites intrinsèques aux matériaux. Les matériaux utilisés pour les applications de haute puissance doivent présenter une absorption la plus faible possible à la longueur d'onde d'intérêt, typiquement sous la ppm

(partie par million), une largeur de bande interdite élevée (autour de 9eV pour la silice UV par exemple) et très peu d'impuretés. La préparation des surfaces de ces matériaux, notamment l'étape de polissage, est particulièrement critique puisque du fait des processus abrasifs et des éléments utilisés (micro/nanoparticules d'abrasion) la surface est caractérisée par la présence de fractures et résidus de polissage particulièrement délétères pour la tenue au flux laser. Les procédés adaptés doivent donc réduire autant que possible l'épaisseur de la couche superficielle affectée par le polissage. Le nettoyage, le stockage des composants et de manière générale tout ce qui peut amener à la présence de contaminants sur la surface (environnement des optiques) sont également des points critiques à maitriser. Les couches minces optiques sont présentes sur la majorité des composants optiques utilisés dans les systèmes lasers pour contrôler spectralement la réflexion et la transmission. Ces traitements multicouches sont souvent un point faible en ce qui concerne la tenue au flux laser car les matériaux déposés n'ont pas la qualité des matériaux massifs et présentent des défauts structurels et macroscopiques. Le choix des matériaux, les conditions de fabrication et la conception de l'empilement ont une influence majeure sur la tenue au flux laser.

Enfin la seule possibilité restante pour augmenter la puissance laser reste de diminuer la densité de puissance en augmentant la surface du faisceau, d'où le gigantisme de certaines installations lasers (Laser Mégajoule par exemple). Une alternative consiste également à « réparer » les dommages laser [5].

RÉFÉRENCES

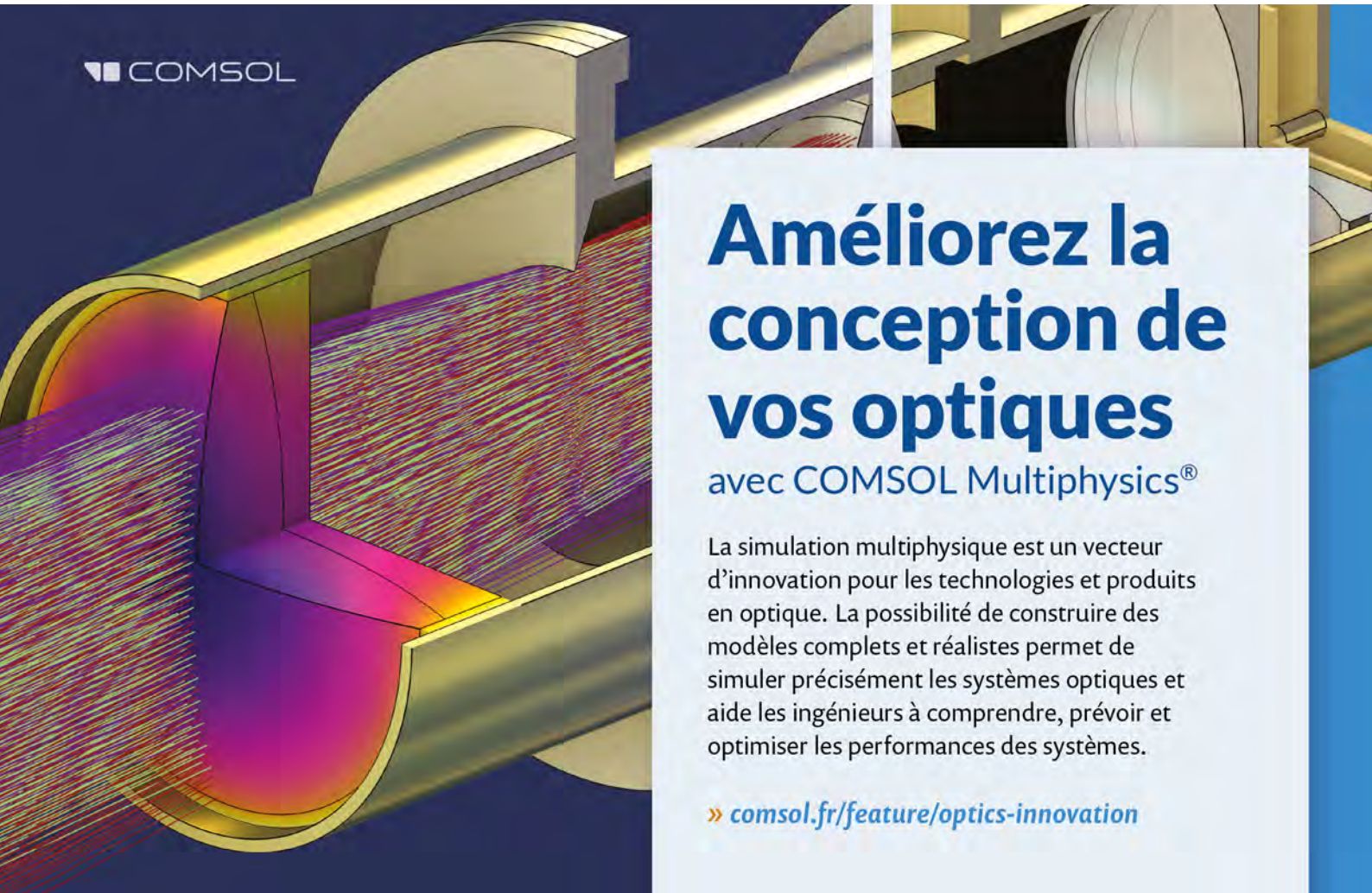
[1] ISO Standard Nos. 21254-1-212541-4, 2011.

[2] L. Gallais, 'Métrologie de l'endommagement laser', Techniques de l'ingénieur R 6 738 (2010)

[3] L. Lamaignère *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **90**, 125102 (2019).

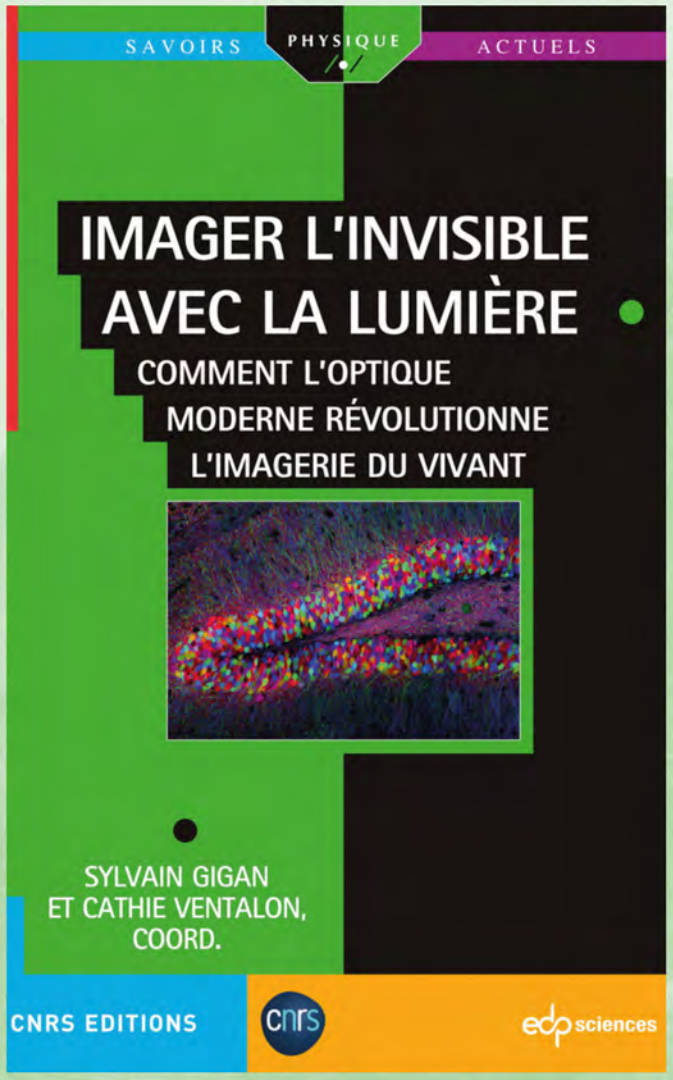
[4] H. Krol *et al.*, Opt. Commun. **256**, 184 (2005).

[5] L. Gallais et P. Cormont, 'Procédés d'usinage laser CO2 de composants optiques en silice', Photoniques **112**, 36 (2022).



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.

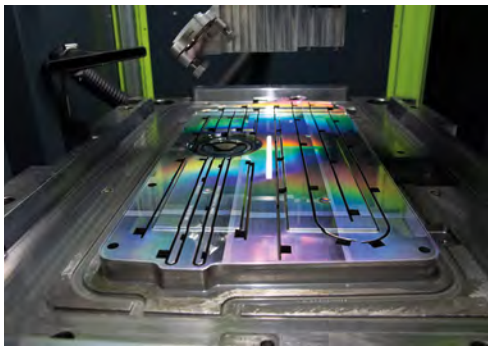
Sylvain Gigan est professeur à Sorbonne Université et chercheur au Département de Physique de l'Ecole normale supérieure. Il travaille sur la propagation de la lumière, en particulier pour l'imagerie, dans les milieux complexes et biologiques.

ACHETER UNE PRESTATION DE PROCÉDÉS LASER

Emma VERDIER[1,*], Marc FAUCON[1]

[1] Centre Technologique ALPhANOV, Institut d'Optique d'Aquitaine, Rue François Mitterrand, 33400 Talence, France

***emma.verdier@alphanov.com**



Le développement des études de l'interaction laser/matériau allié aux progrès technologiques croissants des fournisseurs de sources laser ainsi que des éléments constituant les systèmes d'usinage permettent depuis plusieurs dizaines d'années d'accompagner industriels et enseignants chercheurs dans l'intégration de procédés laser pour leurs activités de sous-traitance ou de recherche développement et innovation.

https://doi.org/10.1051/photon/202311853

Lorsque la question se pose d'intégrer ou de développer une application laser dans votre entreprise ou laboratoire, plusieurs cas de figures sont possibles selon votre projet. Le choix peut se porter sur l'investissement dans un système ou machine laser, dans une source laser seule ou bien dans une prestation de services. Cette dernière vous permettra selon le stade de votre projet d'obtenir des conseils, de faire réaliser une veille technologique, une preuve de concept ou une étude de faisabilité, une prestation de présérie et un accompagnement pour une mise en production. Cette prestation de services permettra de bien définir la technologie laser à utiliser et de limiter le risque d'échec technique et financier de l'intégration de la technologie.

DOMAINES D'ACTIVITÉS

Tous les domaines d'activités peuvent prétendre à l'utilisation d'un procédé laser mais aujourd'hui certains domaines tels que l'industrie automobile, l'industrie aéronautique et aérospatiale, la plasturgie ou l'électronique ont été précurseurs en la matière. Les industries du luxe, agroalimentaire, textile ou encore les métiers du bois et du papier ont également intégré l'usinage ou le micro-usinage par laser dans leur processus de fabrication avec des souhaits grandissants d'innover à travers de nouveaux matériaux à travailler, d'augmenter la productivité ou encore de tendre, grâce au laser, vers des processus de fabrication plus « verts ».

Les termes « procédés laser » regroupent aujourd'hui l'étude de l'impact d'un faisceau laser sur un matériau pour des applications aussi variées que la découpe, le perçage, le marquage/gravure, le soudage ou encore la fonctionnalisation des surfaces (Figure 1) afin d'obtenir le meilleur compromis qualité/productivité. Un large choix de source laser pour l'usinage ou le micro-usinage par laser est proposé par les concepteurs. Cet article a pour objectif d'aider industriels et chercheurs à choisir le bon partenaire ou et la bonne plateforme pour répondre à leurs besoins.

LES DIFFÉRENTS PROCESSUS D'INTERACTION LASER

Nous distinguons trois processus d'interaction en fonction de la durée d'impulsion, de la longueur d'onde du laser et de la nature de la cible (Figure 1). Les lasers continus ou à impulsions longues (>10ps) émettant dans l'IR ou le visible •••

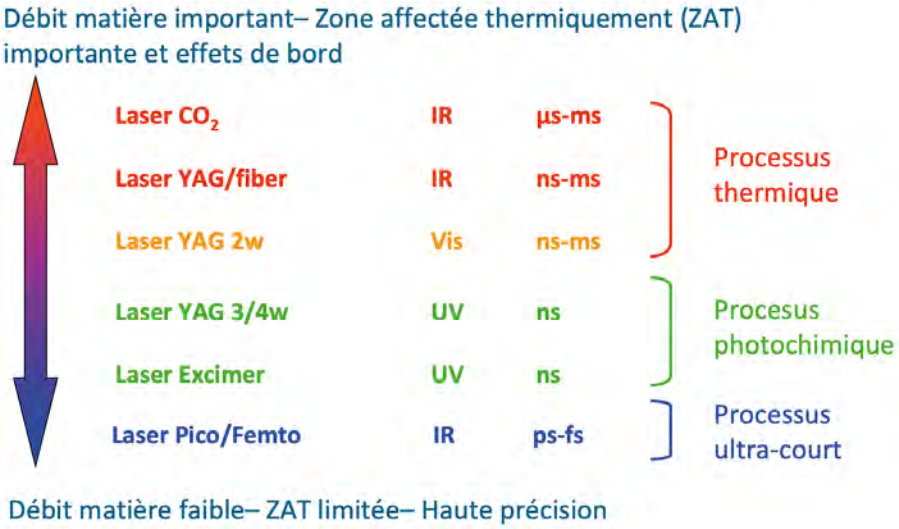


Figure 1. Technologies lasers utilisées pour l'usinage ou le marquage des matériaux par rapport à ces trois processus d'ablation.

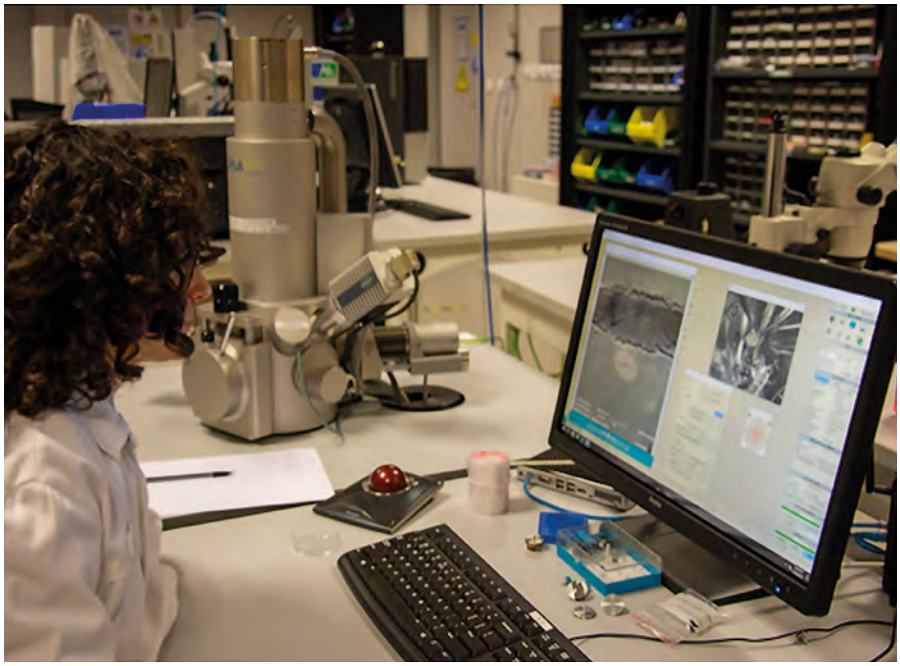
interagissent avec la matière selon un processus thermique. Ils privilégient le débit de matière au détriment de la qualité d'usinage avec effets collatéraux en périphérie d'usinage (thermique ou mécanique). La plupart des lasers utilisés en micro-usinage ou en marquage entrent dans cette catégorie. A l'opposé, la brièveté des impulsions des lasers pico ou femtosecondes permet d'usiner tout type de matériau indépendamment de ses bandes d'absorption tout en minimisant les effets thermiques sur la cible, privilégiant ainsi la précision et la qualité d'usinage au détriment du débit matière. Enfin, les lasers UV sont adaptés à l'usinage des polymères ou lorsque l'on recherche une ablation sélective (polymère/métal, polymère/verre ou métal en couche mince/verre ou polymère) puisque la différence des seuils d'ablation est plus marquée dans la gamme UV que dans l'IR. De même, la plupart des matériaux absorbent mieux dans UV que dans l'IR ; de fait l'épaisseur de l'interaction est plus fine dans l'UV.

CE QUE PROPOSE UNE PRESTATION DE PROCÉDÉS LASER

L'offre de prestation de procédés laser consiste à déterminer la technologie laser et à choisir les paramètres laser optimaux répondant à un cahier des charges fonctionnel ou esthétique selon votre domaine d'activités. Au-delà d'une longue expérience et expertise sur les phénomènes physiques liées aux interactions laser / matériaux, les paramètres laser sont directement liés à la maîtrise des organes ou briques technologiques constituant un système d'usinage par laser à savoir : la source, les optiques de mise en forme de faisceau, le système de déplacement du faisceau ou de la pièce et les optiques de focalisation. Peut également intervenir dans une prestation de procédés laser, le contrôle de l'environnement de travail comme pour les travaux de soudage par laser nécessitant des apports de gaz ou bien des travaux sous vide dans certains cas spécifiques. L'air comprimé et le gaz peuvent également être utilisés pour améliorer l'éjection des poussières générées lors de l'usinage ou bien éviter l'oxydation des métaux. De nombreuses offres proposent également le prototypage, la mise en production et le transfert du procédé dans le milieu industriel. Une prestation de procédés laser n'existe bien évidemment pas sans les moyens de caractérisation associés aux grandeurs ou valeurs que l'on souhaite observer et certains établissements proposent la location de leur matériel à l'heure ou à la journée.

Le faisceau laser est caractérisé par sa longueur d'onde, sa puissance moyenne, sa cadence de tir et sa

Figure 2. Observation et mesure de pièces texturées par laser à l'aide d'un MEB.



durée d'impulsion si le laser considéré est impulsionnel.

Longueur d'onde : du nm au µm

La longueur d'onde pour un cas d'utilisation donné dépend de l'application et du matériau. Comme dit précédemment, les matériaux ont des propriétés d'absorption uniques ce qui entraînera différentes interactions avec le matériau (figure 1) ce qui a un impact direct sur la qualité mais aussi la résolution de l'usinage en raison de la dépendance à la longueur d'onde de la taille du faisceau focalisé.

Puissance et énergie : W et J

La puissance d'un laser est mesurée en watts (W) et sert à décrire soit la sortie de puissance optique d'un laser à onde continue (ou CW pour « continuous wave »), soit la puissance moyenne d'un laser pulsé. Les lasers pulsés se distinguent également par leur énergie d'impulsion, mesurée en joules (J). La puissance d'un laser est directement reliée la productivité de l'usinage.

Durée de l'impulsion : de la fs à la ms

La durée d'impulsion détermine la nature de l'interaction de la lumière avec la matière (figure 1) et a donc un impact à la fois sur la productivité et la qualité de l'usinage. Les lasers ultra-brefs, qui présentent de nombreux avantages pour tout un ensemble d'applications sont caractérisés par des durées d'impulsion très brèves, de l'ordre de la picoseconde ($<10.10^{-12}$ s) à la femtoseconde (10^{-15} s).

Fréquence de répétition : du Hz au MHz

La fréquence de répétition d'un laser pulsé, ou fréquence de répétition d'impulsion, décrit le nombre d'impulsions émises chaque seconde. Des fréquences de répétition élevées entraînent une diminution du temps de relaxation thermique de la matière et peuvent augmenter les effets d'accumulation thermiques.

Les paramètres décrits ci-dessous ont aussi une influence déterminante sur la qualité d'usinage et sur la robustesse du procédé. Ces paramètres sont déterminés par le montage optique, c'est-à-dire par la taille du faisceau avant focalisation et par la lentille de focalisation.

Lentilles de focalisation

Les lentilles utilisées avec un scanner XY sont des lentilles f-theta ou des lentilles télécentriques. Les lentilles f-theta et télécentriques permettent d'obtenir un plan de focalisation sur tout le champ XY contrairement aux lentilles standard pour lesquelles il est courbe.

Taille du faisceau focalisé

La taille du faisceau focalisé est dépendante de la distance de focalisation et du diamètre du faisceau sur l'optique de focalisation. Plus le diamètre du faisceau est important sur l'optique de focalisation et plus la distance de focalisation est courte, plus la taille du faisceau focalisé est réduite.

Profondeur de champ

La profondeur de champ va définir la robustesse du procédé laser. Une profondeur de champ importante garantie une moins grande sensibilité aux variations de niveau de la pièce ce qui renforce l'uniformité de l'usinage sur l'ensemble de la zone gravée.

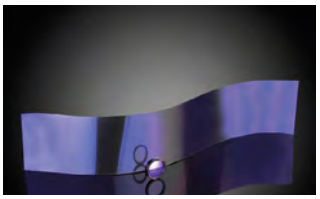
Chaque paramètre a une influence à la fois sur la qualité et la productivité avec un poids plus ou moins important. La prestation de procédés laser permettra de trouver le meilleur point d'équilibre pour répondre au cahier des charges du client.

CONCLUSION

L'étude de l'interaction entre le matériau et le laser est en forte croissance, la relocalisation des moyens de production en Europe poussent industriels, Start up ou grandes entreprises, à intégrer des technologies innovantes et performantes comme les applications laser dans leur processus de fabrication. Cette diffusion des technologies lasers permet ainsi de diminuer l'impact environnemental d'un processus en réduisant la production de déchets chimiques par exemple ainsi qu'en réduisant les temps de cycle de production (reprise pièce, nettoyage, contrôle qualité...) et par conséquent la réduction des coûts de fabrication.

	TYPES DE PRESTATIONS	DESCRIPTIF PLATEFORME/ OUTIL	MARCHÉS VISÉS	CONTACT COMMERCIAL
ALPHANOV	Étude de l'interaction laser matière Étude de faisabilité Prestation Prototypage Sous-traitance Transfert de procédé	Parc de plateformes laser dont lasers femtosecondes Robot 6 axes Machines de soudage Location de matériel métrologie	• Automobile • ASD • Forge et fonderie • Luxe • Énergie • Défense • Micro-mécanique • Médical • Agroalimentaire	Emma Verdier emma.verdier@alphanov.com 05 24 54 52 77
MANUTECH	Étude de faisabilité concernant l'usinage ainsi que la fonctionnalisation de surface	Parc de plateformes lasers dont des lasers femtosecondes, environnement robot et machine de fabrication additive	• Médical • Automobile • Aéronautique • Sécurité	contact@manutech-usd.fr 09 72 50 30 36
IREPA LASER	• Étude de faisabilité • Production Accompagnement à l'industrialisation • Conseil et expertise • Soudage laser • Fabrication additive • Fonctionnalisation de surface	Machine de fabrication additive 3D Robot de soudage laser Machines de micro-usinage 3D (nanoseconde, femtoseconde)	• Automobile • ASD • Forge et fonderie • Luxe • Énergie • Défense • Micro-mécanique • Médical	Jean Paul Gaufillet jpg@irepa-laser.com 03 59 28 39 32
MICRO-USINAGE LASER	Production ou Opérations de micro-usinage	Plateformes de production Microscope numérique 3D, mesure tri-dimensionnelle Industrie électronique	• Recherche • Secteur médical • Mécanique, • Horlogerie	mul@micro-usinage-laser.com 05 34 57 84 98
PIMM	• Fabrication additive • Soudage laser • Grenaillage laser • Assemblages par soudage laser • Étude de l'interaction laser/ matière	• Rayons X • Goniomètres 4 cercles • Robot 6 axes • Banc de diffusion centrale mesures SAXS/ WAXS • Bancs de fatigue • Banc de poinçonnage dynamique • Energie • Aéronautique • Armement	• Énergie • Aéronautique • Armement	pimm-contact@ensam.eu
LASER RHÔNE ALPES	Spécialiste en sous-traitance laser • Marquage et gravure • Micro-découpe • Soudage laser • Soudage sous atmosphère contrôlée • Transfert de technologie • Conception d'outillage • Montage, finition et contrôle	• Machines 4 ou 5 axes • Sources laser : YAG pulsé ou continu, diodes et fibres • Laser de marquage • Machine spéciale de soudage laser	• Aérospatial • Aéronautique • Energie • Nucléaire • Industrie • Medical	contact@laser-rhone-alpes.com (33) 04 76 56 07 57

FILTRES NOTCHS HOLOGRAPHIQUES DE GRANDE TAILLE



Edmund Optics® et Meta Materials Inc. (META®) s'associent pour lancer les Filtres Notch META® holoOPTIX™, une nouvelle ligne de produits de filtres notch holographiques flexibles de grande taille. Les filtres notch ont la capacité de maintenir leur fréquence de coupure pour des angles d'incidence élevés. Deux configurations différentes sont disponibles : FLEX et STRATA.
https://www.edmundoptics.com/f/metar-holooptixt-notch-filters/39902/#

Lasers Nd:YAG pompés par diodes

Les Merion MW HP sont des lasers Nd:YAG impulsionnels nanosecondes pompés par diodes, permettant d'atteindre des hautes puissances. Intégrant les briques technologiques développées pour la série Merion MW conjuguées dans une configuration "oscillateur-amplificateur", ces nouveaux lasers sont capables d'atteindre des puissances jusqu'à 100W à 1064 nm en pompage par diodes.
https://www.quantel-laser.com/fr/produits/item/merion-mw-hp.html

Laser à fibre pour l'excitation des ions baryum

NKT Photonics lance un laser à fibre pour l'excitation des ions baryum à 1762.17 nm, le Koheras ADJUSTIK HP T20. Ce nouveau laser à fibre est conçu spécifiquement pour la transition 6S à 5D du baryum. Ce laser offre un fonctionnement monofréquence robuste, une largeur de ligne étroite de 10 kHz et une puissance élevée de 500 mW à 1762.17 nm.

https://www.nktphotonics.com/news/new-fiber-laser-for-1762-nm-ba-ion-excitation/

Spectromètres MIR haute cadence 2 - 12 µm

Le spectromètre MIR NLIR est basé sur une technologie d'upconversion qui convertit le signal MIR en lumière proche du visible, ce qui permet de bénéficier des performances accrues des détecteurs en silicium en termes de détectivité, de vitesse et de bruit. Le spectromètre est fabriqué suivant deux modèles : une version S76120-50 économique avec une fréquence maximale de 50 Hz et le modèle S76120-130k allant jusqu'à 130 kHz.

https://www.optonlaser.com/fr/produit/spectrometre-mir-haute-cadence

SYSTÈME D'ANALYSE ET DE MESURE DES FAISCEAUX LASER DE HAUTE PUISSANCE

Le système Ophir® BeamPeek de chez MKS associe analyse de profil et mesure de puissance pour une mesure précise et rapide des faisceaux laser dans les chambres de fabrication additive. En seulement trois secondes, le BeamPeek est capable de fournir le profil du faisceau, l'analyse focale et la mesure de puissance.
https://www.ophiropt.com/laser--measurement/beam-profilers/products/High-Power-Beam-Profiling/beampeek

OPTON LASER INTERNATIONAL

LASERS

Des experts à votre service, de l'avant à l'après-vente

- Continu - Pulsé : ns, ps, fs
  - UV au THz
    - Solide, fibre, gaz / Q-switch actif ou passif
      - Longueur d'onde fixe, accordable

Découpe / Ablation · Détection de gaz · Inspection de wafer · Lidar · Marquage / Gravure / Lithographie · Microdissection · Perçage · Photo-acoustique · Spectroscopie / Spectrométrie de masse

ACCESS LASER Member of the TRUMPF Group · AdValue Technology · ALPES LASERS · CNI · CryLaS · DRS DAYLIGHT SOLUTIONS

EKSPLA · FYLA · IRADION Ceramic Core CO_2 Lasers · JENOPTIK · LASOS · nanoplus

PicoQuant · Quantum Light Instruments · SIOS Meßtechnik GmbH · TOPTICA · Xiton Photonics · Z-LASER

www.optonlaser.com