

Photoniques

LA LUMIÈRE ET SES APPLICATIONS

FOCUS

Nouvelle-Aquitaine

BIOGRAPHIE

Ignace-Gaston Pardies

EXPÉRIENCE

La pince optique

COMPRENDRE

Imagerie polarimétrique

DOSSIER

AVANCÉES SUR LES LASERS

- Les lasers thulium à 2300 nm : avancées et perspectives
- Laser infrarouge à base de semi-conducteurs de la filière silicium
- États originaux de la lumière par structuration 3D de l'émission d'un laser à métasurface
- Optique attoseconde et électronique pétahertz dans les semiconducteurs



Mesurer des impulsions laser ultracourtes



NICOLAS BONOD
Rédacteur en chef

L'odyssée du laser

1951, université de Columbia. Charles Townes, motivé par le bureau des affaires navales, cherche à développer une source puissante de rayonnement électromagnétique. Ce physicien expérimenté, spécialiste des molécules depuis les années 1930, trouve la solution en plaçant les atomes dans une cavité. Moins de 3 ans plus tard, les premières ondes électromagnétiques produites par émission stimulée sont émises. S'en suit une féroce compétition pour appliquer ce principe à la lumière. Gordon Gould, jeune docteur de l'université de Columbia et spécialiste du pompage optique a l'occasion d'échanger avec Charles Townes. En 1956, il note dans un cahier de laboratoire des idées basées sur l'utilisation d'une cavité optique formée de deux miroirs. La première page s'intitule « *Some rough calculations on the feasibility of a LASER: light amplification by stimulated emission of radiation* » : la course au laser est définitivement lancée, et la compétition est rude. On connaît l'histoire. Le 16 mai 1960, Theodore Maiman observe une émission rouge d'un rubis par une lampe flash.

61 ans plus tard, les lasers ont non seulement révolutionné l'optique mais bien d'autres domaines également. Puissance, cohérence, monochromaticité, directivité, résolution temporelle, ces nouvelles propriétés de la lumière ont significativement ouvert le champ des possibles, des nanosciences aux études spatiales. Pas un domaine n'y échappe, des produits pour le grand public aux recherches les plus fondamentales. Des nanolasers au développement des chaînes lasers de puissance, des lasers continus aux lasers ultracourts, les propriétés et applications de ces sources de lumière n'ont cessé de s'étendre. Les articles de ce dossier spécial témoignent des recherches menées pour atteindre de nouvelles fenêtres spectrales, de nouveaux domaines temporels, pour structurer les propriétés spatio-temporelles des faisceaux ou concevoir des microlasers facilement intégrables sur puces photoniques.

En 1960, 10 ans seulement après la première émission laser, Arthur Ashkin publie une étude dans laquelle il ouvre un nouveau domaine d'investigation offert par le laser: le piègeage optique.

La première phrase du résumé de son article est explicite « *Micron-sized particles have been accelerated and trapped in stable optical potential wells using only the force of radiation pressure from a continuous laser.* » Ce n'est pour Ashkin que le début d'une fabuleuse histoire récompensée en 2018 par le Prix Nobel de Physique, histoire décrite dans ce numéro dans l'article Expérience Marquante.

Le focus de ce numéro est consacré à une région ayant une forte expérience dans les lasers, la Nouvelle-Aquitaine. Quant à l'article Acheter, il est consacré aux auto-corrélateurs optiques. Comme vous pouvez le constater, 'cohérence' fut le maître-mot du comité de rédaction durant l'élaboration de ce numéro. Et pour un numéro dédié aux lasers, il ne pouvait en être autrement ! C'est pour moi l'occasion de remercier les membres du comité de rédaction. Leur grande culture scientifique et leur engouement pour la photonique sont des atouts précieux pour enrichir le contenu de la revue et garantir des contenus rédactionnels riches et variés. Je vous souhaite une bonne lecture.



Sommaire

www.photoniques.com

N° 109

19

FOCUS
La photonique
en Nouvelle-Aquitaine

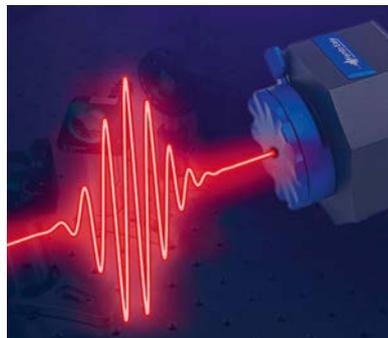


57

Comprendre :
L'imagerie
polarimétrique

61

Mesurer
des impulsions
laser ultracourtes



ACTUALITÉS

- 03 Éditorial et actualités de la SFO
- 04 Informations partenaires
- 14 Actualité de la Photonique

TÉMOIGNAGES

- 16 Témoignage d'entrepreneur
- 18 Entretien avec Marie-Begoña Lebrun

FOCUS

- 19 La photonique en Nouvelle-Aquitaine

BIOGRAPHIE

- 28 Ignace-Gaston Pardies

EXPÉRIENCE MARQUANTE

- 31 La pince optique, un outil interdisciplinaire

DOSSIER : AVANCÉES SUR LES LASERS

- 35 Les lasers thulium à 2300 nm : avancées et perspectives
- 40 Laser infrarouge à base de semi-conducteurs de la filière silicium
- 46 États originaux de la lumière par structuration 3D de l'émission d'un laser à métasurface
- 52 Optique attoseconde et électronique pétahertz dans les semiconducteurs

COMPRENDRE

- 57 L'imagerie polarimétrique

ACHETER

- 61 Mesurer des impulsions laser ultracourtes

PRODUITS

- 65 Nouveautés

Annonceurs

2b Lighting Technologies 51
ALPhANOV 23
A.P.E Berlin 63, IV^e de couv.
ARDOP 21, 24
CEA Cesta 24
CELIA 27

COMSOL 23
Edmund optics 45, 47
EPIC 07
GLPhotonics 17
Hamamatu 25
HTDS 49
IDIL fibres optiques 33
Imagine optic 59

ISP System 26
IXblue 26
Laser components 39
OPTITEC 09
Pro-Lite 27
SANTEC 37
ScienTec 61
Spectrogon 53

Spectros 55
SPIE 15
Trioptics 43
Zürich Instruments II^e de couv.

Crédit photo (couverture):
© iStockPhoto

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
mariam.mellot@institutoptique.fr
Tél. : +33 (0)1 64 53 31 82

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

Editorial secretariat and layout

Studio wake up!

<https://studiowakeup.com>

Comité de rédaction

Pierre Baudoz (Observatoire de Paris), Azzedine Boudrioua (Institut Galilée, Paris 13), Émilie Colin (Lumibird), Céline Fiorini-Debuisschert (CEA), Riad Haidar (Onera), Wolfgang Knapp (Club laser et procédés), Patrice Le Boudec (IDL Fibres Optiques), Christian Merry (Laser Components), François Piuze (Société Française de Physique), Marie-Claire Schanne-Klein (École polytechnique), Christophe Simon-Boisson (Thales LAS France), Costel Subran (F2S - Fédération des Sociétés Scientifiques), Ivan Testart (Photonics France).

Advertising

Annie Keller

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

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

annie.keller@edpsciences.org

International Advertising

Bernadette Dufour

Cell phone + 33 7 87 57 07 59

bernadette.dufour@edpsciences.org

Photoniques est réalisé par

EDP Sciences,

17 avenue du Hoggar,

P.A. de Courtaboeuf,

91944 Les Ulis Cedex A, France

Tél. : +33 (0)1 69 18 75 75

RCS : EVRY B 308 392 687

Gestion des abonnements

abonnements@edpsciences.org

Impression

Fabrègue imprimeur

B.P. 10

87500 Saint-Yrieix la Perche

Dépôt légal : août 2021

Route : STAMP (95)



IMPRIM'VERT

L'édito de la SFO



PHILIPPE ADAM

Président de la SFO

Bonjour à toutes et tous !

A chaud, à peine rentré d'OPTIQUE Dijon 2021 ! Un amphiplein jusqu'au dernier jour pour notre congrès a été une grande joie et une grande fierté. Une joie car notre communauté a prouvé son envie forte de renouer des liens de convivialité et d'échanges après la période que l'on vient de vivre. Une fierté également d'avoir tenu bon depuis le début, *i.e.* juillet 2020, dans l'idée d'organiser OPTIQUE 2021 à Dijon, en présentiel ... et d'y être parvenu !

Vous dire que cette période a été d'une totale sérénité serait faux, la situation ne s'éclaircissant qu'à partir de mi-mai. Mais on a tenu bon et fort de la réactivité et de l'envie de tous, notre récompense est d'avoir pu nous réunir dans des conditions sanitaires parfaitement satisfaisantes.

Cette période compliquée nous a aussi amené du bon, tant on a revisité la machinerie SFO de fond en comble. On a essayé de remédier à nos faiblesses avec les « réparations » qui s'imposaient. De manière plus positive, nos atouts se sont révélés et quelques pistes de progression ont émergé :

- Une inscription dans un paysage photonique, somme toute stable et solide ; les échanges productifs avec l'ensemble du secteur se sont avérés faciles et fructueux. Pour preuve nos interactions constantes avec SFP, EOS, OSA, PF et d'autres encore pour maintenir nos activités et notre rayonnement.
- Des offres de service renouvelées : PHOTONQUES qui est toujours et de

plus en plus notre porte-drapeau, des offres renouvelées d'adhésions qui pérennisent notre activité, des événements comme les écoles thématiques et journées de club, amplifiées et ouvert à l'international par le distanciel,

- Quelques idées-forces pour le futur dont des initiatives à venir dans le domaine de la francophonie, de l'aide à la création d'une filière optique-photonique et d'autres encore.

Notre Congrès Optique Dijon 2021 a aussi été un forum d'échanges chercheurs-industrie grâce aux industriels qui ont répondu présent. On les remercie : ceci n'était pas évident par les temps qui courent !

Quelques chaleureux remerciements :

- Au Prof. Gérard MOUROU, Prix Nobel 2018 qui nous a fait l'honneur de présider la session inaugurale. Je voudrais également y associer tous les orateurs des conférences plénières.
- À Guy MILLOT, Président du Comité local d'Organisation. Nous sommes bien placés pour témoigner que ce fut une tâche rude mais passionnante.
- Aux clubs et commissions de la SFO dont les activités ont constitué l'essentiel des éléments du programme. Ils ont su maintenir la flamme et c'était important, tant l'échange est à la base de nos activités.

Merci à toutes et tous pour votre réactivité et votre implication.

Optiquement vôtre
Philippe ADAM

RENOUVELLEMENT DU CONSEIL D'ADMINISTRATION DE LA SFO

Appel à candidature

Tous les deux ans une partie du conseil d'administration doit être statutairement renouvelée, 5 sièges électifs sont à renouveler pour 2021.

Les personnes désireuses de faire acte de candidature sont invitées à se faire connaître auprès de la Secrétaire Générale de la SFO avant le 31 août 2021 en envoyant leur formulaire de candidature disponible sur le site de la SFO, accompagné d'un texte de présentation de 5 à 10 lignes, décrivant leur parcours professionnel.

AGENDA

■ OPTIQUE Nice 2022, 4 au 8 juillet 2022

Vous pouvez dès maintenant bloquer ces dates dans vos agendas

■ École thématique SFO 2022

Les Houches, 14-25 février 2022

Ondes en milieux complexes : de la théorie à la pratique
Cette école s'inscrit dans le cadre de l'effervescence actuelle liée à la physique des ondes dans les milieux complexes.

Cette thématique couvre non seulement l'optique, les ondes radios, mais également l'acoustique (ondes sonores, ultrasonores, sismiques) et même les ondes de matière.

■ Assemblée Générale de la SFO

Elle aura lieu en Visioconférence
**le jeudi 21/10/2021
de 10h00 à 12h00**

LES ÉVÈNEMENTS PARRAINÉS DE LA SFO :

■ EOSAM Rome 2021 13 au 17/09

■ French Photonics Days 2021 Imagerie Innovantes et applications Marseille, 30/09 au 01/10

■ ECOC Bordeaux 2021 12 au 16/09

■ ISOT Besançon 2021 03 au 05/11

■ EEDAL 2021 08 au 11/11

Tous les événements de l'agenda SFO :
www.sfoptique.org/agenda/

Retour sur OPTIQUE Dijon 2021

C'était un grand plaisir pour la communauté de l'Optique-Photonique de se retrouver et d'échanger enfin en face-face.

Plus de 660 participants ont assisté au congrès d'Optique de la SFO avec 43 stands pour l'exposition industrielle et 10 stands pour l'exposition pédagogique.

Nous vous donnons RDV à OPTIQUE NICE, bloquez cette date dans vos agendas : du lundi 04 juillet au vendredi 08 juillet 2022.

Un grand MERCI à Guy MILLOT, président du comité de programmation d'OPTIQUE Dijon et un grand MERCI à Philippe ADAM, président de la Société Française Optique d'avoir œuvré pour permettre à cette édition de se réaliser à 100% en PRÉSENTIEL.



Suivez nous sur www.sfoptique.org



LA FORMATION CONTINUE : UNE MISSION DE L'IOGS



Le contexte de sortie de crise a fait émerger une demande importante de reconversions – en particulier dans les domaines de l'optique et de la photonique. Dans certains secteurs, les entreprises ont beaucoup souffert, conduisant de nombreux salariés en réorientation de carrière. Et bon nombre d'entre eux se tournent vers les métiers de l'optronique, de l'électro-optique, des traitements d'images... En France, nous avons la chance

d'avoir un tissu industriel qui ne demande qu'à recruter, avec des besoins forts en techniciens, en ingénieurs et notamment dans le domaine de la R&D et de la production industrielle.

Pour répondre à cette demande, la Formation Continue de l'IOGS s'engage ainsi dans une nouvelle dynamique : notre nouveau catalogue des stages témoigne de plusieurs évolutions de nos activités et de notre organisation. **Nous proposons une gamme de**

40 stages de formation allant d'un niveau basique à des niveaux très avancés. Par ailleurs, depuis 18 mois, **nous avons reconfiguré certains de nos stages pour les adapter au distanciel.** En complément du catalogue, nous répondons également aux demandes de stages « sur-mesure » en intra-entreprise pour former des équipes de jeunes recrutés ou accompagner des reconversions dans les services. Dans chaque cas, nos séances de TP ou de démonstrations expérimentales, qui s'appuient sur les moyens de l'École d'ingénieur de l'Institut d'Optique, constituent un atout très fort de nos formations : elles nous permettent de répondre aux demandes des entreprises pour la mutation de leurs salariés sur les métiers de l'optique et de la photonique pour les rendre opérationnels dans leurs nouvelles tâches techniques.

Une demande croissante issue de Pôle Emploi a stimulé la déclaration et le référencement de nos stages dans DOKELIO. **Ce référencement fait désormais apparaître nos stages sur l'interface Kairos de Pôle Emploi,** et permet ainsi de composer des parcours de formation pour des personnes en réorientation de carrière.

Plus d'informations : <https://fc.institutoptique.fr/>

Zoom sur Opto Services : la Junior-Entreprise de l'Institut d'Optique

Fondée en 1980, Opto Services met en relation entreprises et futurs ingénieurs de l'IOGS et les accompagne afin de réaliser des études autour des domaines d'expertise de l'école : étude et caractérisation optiques, conseil en ingénierie, simulation et design optique ou encore bibliographie et traduction de documents techniques. Opto Services est devenue au fil des années une référence en optique et en optronique : nous avons eu l'honneur de faire partie en 2019 de la L30, liste des 30 meilleures JE de France établie par la CNJE (Confédération nationale des Junior-Entreprises) chaque année.

Afin de garantir des prestations de qualité, nous pouvons compter sur les conseils des professeurs et chercheurs de l'IOGS mais également de l'écosystème unique de l'école : les 3 sites sur lesquels sont répartis les élèves (Palaiseau, Bordeaux et Saint Étienne) permettent aux consultants

de bénéficier de matériel et logiciels adaptés ainsi que de l'accès à différentes équipes des laboratoires.

Des entreprises de toute taille nous ont fait confiance : de la PME (HGH, Image Optic, etc.) aux grands groupes (Airbus, Thalès, Safran, Orange etc.). En 2021, nous avons conçu différentes solutions de schémas optiques pour la fabrication d'une lampe de Sysmo Engineering. La même année, l'entreprise Lixo nous a sollicités pour améliorer l'acquisition d'images afin d'aider à la caractérisation de différents déchets à partir d'un éclairage adapté.

Chaque étude est personnalisée selon vos attentes. N'hésitez pas à nous contacter pour que nous étudions ensemble vos besoins !

Mail : opto.services@institutoptique.fr

Site internet : opto-services.fr

Adresse : 2 Avenue Augustin Fresnel,
91120 Palaiseau, France



AGENDA DE LA FORMATION CONTINUE

■ **SC10 Acquisition, perception et traitement d'images,**
du 27 au 30 septembre 2021

■ **SC11 Anatomie d'une caméra infrarouge,**
du 5 au 8 octobre 2021

■ **SC6 Interférométrie optique : principes et applications,**
du 12 au 15 octobre 2021

■ **SC12 Systèmes optroniques,**
du 8 au 10 novembre
et du 24 au 26 novembre 2021

■ **EF2 Bases de l'optique,**
du 16 au 19 novembre
et du 30 novembre
au 1^{er} décembre 2021

SUCCÈS PLEIN POUR OPTIQUE DIJON 2021

Le congrès Optique Dijon a pu se dérouler en présentiel du 5 au 9 juillet au palais des congrès de Dijon. Et le succès fut au rendez-vous ! Jugez-en par vous-même : plus de 650 participants, un stand d'exposition plein, des sessions passionnantes et animées et le plaisir pour les participants de se retrouver et d'échanger.

Le programme scientifique de ce congrès s'articule autour des clubs SFO qui organisent leur session thématique. Cette organisation permet de couvrir un large spectre de thématiques et de fédérer les acteurs francophones de l'optique et photonique autour de sujets phares.

Les entreprises avaient à cœur de participer à ce congrès puisque tous les stands d'exposition ont été réservés. Ces stands d'exposition ont connu un vif succès et ont été fortement animés durant les 5 jours du congrès. Ces échanges entre les acteurs académiques et industriels sont toujours précieux car tous ont à cœur de promouvoir l'optique et de faire avancer les connaissances et les technologies en optique et photonique.

Ce congrès a été l'occasion d'annoncer et de remettre les prix de la SFO. Trois prix décernés tous les deux ans permettent de reconnaître et de récompenser des acteurs de l'optique.



Le Grand Prix Léon Brillouin a été attribué à Jean-Paul Pocholle pour l'ensemble de ses travaux. J.-P. Pocholle a su dépasser les positions arrêtées pour découvrir des horizons nouveaux qui lui ont permis de transformer des « bonnes idées » amont en applications, contribuant ainsi à estomper les frontières entre fondamental et applicatif.

Les Prix Fabry-de Gramont 2019 et 2020 ont été remis respectivement à Frédéric Gérôme de XLIM pour ses travaux dans le domaine des fibres creuses fonctionnalisées et à Bertrand Kibler de l'ICB, pour sa contribution aux ondes « breathers » et son approche multidisciplinaire qui permet d'associer

deux branches distinctes de la physique des ondes : l'optique et l'hydrodynamique. Le Prix Arnulf-Françon récompense un ouvrage destiné à l'enseignement de l'optique dans l'enseignement supérieur ou visant à faire connaître l'optique au grand public. Il a permis de distinguer trois lauréats : Sébastien Chénais, Christophe Daussy et Sébastien Forget pour leur MOOC

« La physique, vive[z] l'expérience ! ». Le visionnage de leur MOOC est d'ailleurs fortement recommandé !

Cette année, le congrès de la SFO a également été très heureux d'accueillir la cérémonie de remise du prix Jean JERPHAGNON organisé par IMT. Il a pour objectif de promouvoir l'innovation technologique et la diffusion de l'optique et de la photonique dans tout domaine d'application. Ce rapprochement entre le prix Jean JERPHAGNON et la SFO s'inscrit parfaitement dans ces considérations et prend donc tout son sens dans ces perspectives. L'optique – photonique est porteuse de potentielles ruptures sociétales fortes : en médecine, dans les télécommunications, dans l'industrie automobile, pour la lutte antiterroriste et la sécurité des populations, en matière de Défense...

Les dates du prochain congrès sont d'ores et déjà connues et rendez-vous est pris pour nous retrouver du 4 au 8 juillet 2022 à Nice !



TÉMOIGNAGE D'ENTREPRENEUR

Florian Emaury, Menhir Photonics
florian.emaury@menhir-photonics.com



Ancien élève diplômé de l'IOGS, Florian Emaury est co-fondateur et actuel CEO de la société Menhir Photonics, société spécialisée dans le développement de lasers ultrarapides.

POUVEZ-VOUS NOUS DÉCRIRE VOTRE FORMATION ET PARCOURS ?

Après une classe préparatoire à Poitiers (Lycée Camille Guérin), j'ai décidé de rejoindre l'Institut d'Optique Graduate School (IOGS) du fait de mon goût pour la physique appliquée.

C'EST DONC À L'IOGS QUE S'EST FORGÉ VOTRE GOÛT POUR L'ENTREPRENEURIAT.

Tout à fait et ce fût grâce à la filière entrepreneuriale de l'IOGS que je l'ai découvert et que j'y ai pris goût. Sans expérience préliminaire dans ce domaine, la Filière Innovation-Entrepreneurs (FIE) m'a réellement ouvert les yeux sur l'entrepreneuriat et m'a donné envie de chercher à résoudre des problèmes autour de moi. Le projet FIE que nous portions avec trois autres camarades (basé sur un détecteur optique à très large champ de vue), nous a ouvert le monde de l'industrie et de l'entrepreneuriat. Ce fût pour moi un excellent tremplin pour identifier mes lacunes, et m'amener à partir travailler en Grande-Bretagne et aux Etats-Unis mais aussi travailler dans un cabinet de brevet. Une césure de 18 mois après l'IOGS en quelques sortes.

VOUS AVEZ ENSUITE COMPLÉTÉ VOTRE FORMATION PAR UNE THÈSE DE DOCTORAT À L'ETH ZURICH.

Faire un doctorat est devenue une évidence durant mon année de césure grâce aux discussions avec de nombreux collègues et l'évaluation du marché du travail dans le domaine spécifique des lasers femtosecondes.

Lié à une motivation personnelle de rester à l'étranger, mais aussi par l'intérêt scientifique et professionnelle de travailler dans un grand groupe de recherche et dans une large université de renom mondial, ma thèse à ETH Zurich (dans le groupe d'Ursula Keller) a été une suite logique de mon parcours.

COMMENT S'EST ENSUITE EFFECTUÉE LA TRANSITION VERS L'INNOVATION ET L'ENTREPRENEURIAT ?

Via des financements suisses, j'ai pu obtenir une position d'environ 18 mois pour travailler sur la maturation d'une technologie de lasers femtosecondes en semi-conducteur d'ETH Zurich pour créer une startup : une FIE « post-doctorat » en quelque-sorte.

Le marché visé de la microscopie était en plein développement et demandeur d'innovation, mais la technologie n'était pas assez mature pour atteindre les besoins demandés.

QUELLES ONT ÉTÉ VOS MOTIVATIONS POUR FONDER MENHIR PHOTONICS À L'ISSUE DE VOTRE POST-DOCTORAT ?

Créer une entreprise avec des valeurs et une mentalité qui nous correspondent, pousser un projet qui nous tient à cœur, mais surtout répondre à un besoin de marché manquant ont été les raisons premières pour créer Menhir Photonics.

COMMENT AVEZ-VOUS IDENTIFIÉ LA TECHNOLOGIE SUR LAQUELLE FONDER MENHIR PHOTONICS ?

Avant de parler de technologie, nous avons tout d'abord identifié un besoin dans le marché des lasers femtosecondes qui correspondait à notre savoir-faire. Forts de cette analyse et de nos compétences, nous avons pu faire des avancées majeures dans le développement et le design des lasers

ainsi qu'inventer une nouvelle technique d'assemblage, pour nous permettre d'offrir des produits d'une qualité inégalée dans notre domaine.

QUELS SONT LES ATOUTS QUE VOUS AVEZ CHERCHÉ À RENFORCER DEPUIS ?

La vente, la production et le contrôle/qualité sont les principaux domaines que nous avons développés depuis la création. Notre équipe technique est très qualifiée et possède une longue expérience industrielle. Elle forme maintenant de nouveaux profils transverses et variés, nous permettant de répondre aux différents besoins d'une start-up et de nos clients mondiaux.

VOTRE MARCHÉ EST-IL PRINCIPALEMENT NATIONAL, EUROPÉEN OU INTERNATIONAL ?

La Suisse est à la pointe dans le développement et la recherche des lasers pulsés, mais nos marchés sont tournés vers ses applications et nous réalisons actuellement > 95 % de nos ventes à l'export, de la Chine aux Etats-Unis.

QUELS SONT LES GRANDS SECTEURS D'APPLICATIONS DE VOTRE GAMME DE LASERS ?

Notre plateforme laser (le MENHIR-1550) est un laser femtoseconde à 1550 nm à très bas bruit et très robuste, dont les applications se déclinent de la distribution du temps & fréquence (pour les télescopes et accélérateurs de particules), mais aussi pour la synchronisation des radars et systèmes de télécommunication dans l'aérospatial et le spatial. Nous avons développé d'une certaine façon une « horloge optique » très précise et très rapide, dont la robustesse nous permettra de l'envoyer dans des satellites dans quelques années. ●

GLOphotonics : pionnière dans l'industrie des fibres à cristaux photoniques à cœur creux

GLOphotonics est une entreprise deep-tech basée à Limoges, leader dans la fabrication et la commercialisation de fibres à cœur creux (HCPCF) et dans la fonctionnalisation de ces fibres à travers la gestion du gaz ou du vide qu'offrent les cellules sur mesure développées par GLOphotonics (PMC).

Notre technologie est à la fois une technologie facilitatrice et une technologie plateforme, caractérisée par des produits multisectoriels et à forte valeur-ajoutée.

Ces fibres et la fonctionnalité que la GLO sait y associer permettent d'offrir des produits clés pour un grand nombre d'applications telles que la conversion de fréquence optique, le déport de faisceau laser ultra-court à haute puissance, la compression d'impulsion laser, la détection et la synchronisation de précision. GLOphotonics dispose d'un catalogue diversifié de composants, de sous-systèmes et de solutions technologiques. Dans le déport de faisceau laser, une large gamme de produits est proposée allant d'une fibre creuse sur mesure à des produits de déport de puissance pour des faisceaux laser ultra-courts hautement sophistiqués qui incluent la gestion des gaz, la gestion thermique, la stabilisation du pointage du faisceau laser et l'intégration dans les systèmes.

GLOphotonics offre également deux familles de produits visant à transformer un faisceau laser :

- Le FastLas est une famille de produits unique permettant de compresser les impulsions laser sub-picosecondes d'un facteur de compression pouvant atteindre 30 et d'obtenir des impulsions aussi courtes que ~10 fs. La technologie FastLas se distingue par sa grande dynamique en énergie d'impulsion laser et en longueur d'onde.

- Le Comblas est une famille de produits de sources lumineuses qui comprend des sources émettant des peignes à large bande allant de l'UV (240 nm) à l'IR. Le Comblas est une alternative idéale aux sources de super continuum lorsqu'une densité de puissance spectrale élevée est requise, ou pour développer une source lumineuse dans des gammes de longueurs d'onde exotiques.

GLOphotonics développe également des cellules compactes afin d'adresser entre autres le domaine de la photonique quantique. En ce sens GLOphotonics est partenaire du consortium Néo-Aquitains Naquidis et également partenaire du projet européen Cryst 3. Ce projet a pour but de développer un nouveau matériau dans lequel des atomes alcalins individuels sont encapsulés dans le noyau creux d'une fibre optique à cristal photonique.

GLO est fier de compter une clientèle large et diversifiée, des partenaires académiques aux entreprises industrielles, et de répondre à leurs besoins avec le même niveau d'engagement dans la fourniture de solution unique et à haute valeur ajoutée.



LA PLATEFORME TECHNOLOGIQUE IDÉALE POUR L'INTERACTION GAZ-LUMIÈRE

DE L'UV À L'IR
DU CONTINU À L'ULTRA BREF
GLO S'ADAPTE À TOUS VOS LASERS

DÉPORT DE FAISCEAU,
COMPRESSION, CONVERSION,
SOLUTION QUANTIQUE

GLOphotonics
The Hollow-Core PCF & Photonic MicroCell® company

contact@glophotonics.fr | www.glophotonics.fr



Entretien avec Marie-Begoña Lebrun présidente-directrice générale de Phasics

PME créée en 2003, Phasics développe des solutions innovantes d'analyse de front d'onde pour les applications de métrologie optique et laser et pour la microscopie.

Quelles ont été selon vous les grandes évolutions qui ont marqué la photonique ces 20 dernières années ?

Il y a 20 ans, la photonique représentait une filière plutôt traditionnelle agissant dans des secteurs optiques spécifiques. La migration de l'électronique et de l'informatique vers les technologies photoniques a propulsé, ces dernières années, la photonique au rang de technologie incontournable et essentielle dans une large majorité de secteurs. La Commission Européenne l'a d'ailleurs inscrite comme l'une des 6 technologies clés génériques d'avenir (KET) au même titre que la nanotechnologie ou la biotechnologie.

La photonique est aujourd'hui omniprésente, sans toujours être visible, et a envahi tous les aspects de notre société : les smartphones, les réseaux de communication, l'éclairage, l'automatisation des véhicules (Lidar), les imprimantes 3D, l'Internet des objets (IoT), les casques de réalité virtuelle/augmentée, les drones, le médical, la défense et le spatial.

Quel regard portez-vous sur le paysage industriel ?

La sphère applicative de la photonique étant très vaste, il est difficile d'évaluer ce marché dans sa globalité, surtout depuis l'arrivée de nouveaux utilisateurs industriels qui ne se revendiquent pas pour autant de ce secteur. Les segments de marché sont nombreux mais malheureusement souvent petits. Le défi pour les entreprises, beaucoup de PME, est de développer des solutions qui puissent satisfaire les applications dans plusieurs marchés, de manière à accroître leur visibilité, rentabiliser leurs investissements et assurer leur croissance.

Heureusement, le marché mondial de la photonique est un marché en expansion

qui a montré une grande résilience face à la crise sanitaire que nous traversons. L'export est un excellent vecteur de développement pour les entreprises qui réalisent une partie importante de leur chiffre d'affaires à l'international. Les principaux débouchés pour les produits se situent en Amérique du Nord (USA et Canada), en Europe et de plus en plus en Asie (Chine, Japon, Taiwan, Corée et Inde).

« ce qui est utile et visualisé par le biologiste n'est pas forcément visible directement dans les oculaires »

Quels secteurs d'activités avez-vous vu évoluer fortement ?

La position stratégique de la photonique dans le développement de la compétitivité des industries devient un enjeu pour beaucoup d'acteurs internationaux qui ambitionnent de prendre un leadership mondial. Pour permettre la production des systèmes photoniques toujours plus performants et complexes, le secteur de la métrologie optique s'est fortement développé au courant des dernières années. Que ce soit pour un contrôle qualité plus précis ou plus rapide, dans les unités de production ou dans les services de R&D, le besoin en métrologie optique accompagne les grands défis technologiques de l'industrie. Les domaines d'activités sont nombreux, on peut citer entre autres, sans pour autant être exhaustif ; les véhicules autonomes dont la sécurité est garantie par la précision des caméras et la télédétection LiDAR ; la téléphonie mobile, où la qualité photographique devient un argument commercial majeur,

nécessitant des assemblages de composants toujours plus complexes ; les télécommunications optiques en espace libre, exigeant une parfaite collimation des optiques pour éviter le risque de perte d'information ; et enfin la défense et l'aérospatial, dont les composants uniques doivent être contrôlés dans leurs conditions exactes d'utilisation pour assurer la véracité des informations acquises.

Vous avez observé avec un regard particulier l'essor de la photonique dans les sciences du vivant et les biotechnologies.

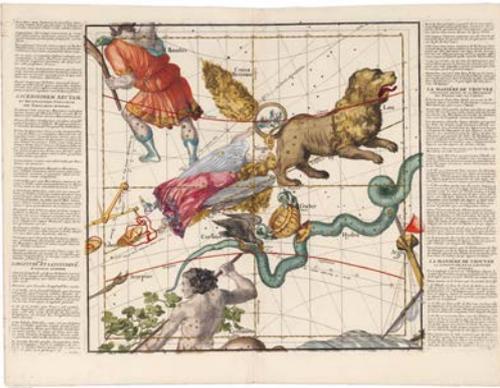
Au début des années 2000, l'imagerie microscopique optique a connu un regain spectaculaire après des décennies sans réelle innovation. Depuis lors, l'avènement de la microscopie de fluorescence et plus généralement de l'imagerie non-linéaire a permis de passer à l'ère de l'imagerie numérique : ce qui est utile et visualisé par le biologiste n'est pas forcément visible directement dans les oculaires mais est le fruit d'un traitement numérique parfois complexe. Dans le domaine de l'imagerie de phase, le fait de pouvoir quantifier celle-ci a relancé l'intérêt de l'imagerie sans marquage, plus respectueuse de l'intégrité des échantillons biologiques, car elle permet de « peser » la matière sèche des cellules. Le prix Nobel attribué en 2016 aux techniques de super-résolution est venu couronner ces innovations.

Dans les prochaines années, l'intelligence artificielle va permettre d'exploiter encore mieux l'immense masse d'informations contenue dans les images multispectrales et multimodales issues des technologies photoniques. On peut donc envisager un bel avenir à la photonique pour les sciences du vivant. ●

Ignace-Gaston Pardies

Par **Claude Fabre**

Laboratoire Kastler Brossel, Sorbonne Université, ENS, CNRS, Collège de France, Campus Pierre et Marie Curie, 75005 Paris, France
claud.fabre@lkb.upmc.fr



Le père jésuite Ignace Gaston Pardies, outre son activité d'enseignant dans les collèges jésuites comme celui de Clermont à Paris, a été au cœur des débats concernant la nature de la lumière, correspondant avec Newton, Leibniz, Huygens et bien d'autres savants européens. Avant Huygens, il a été le premier à proposer une théorie détaillée et argumentée basée sur la nature ondulatoire de la lumière. Malheureusement, son décès à l'âge de 36 ans a prématurément interrompu une carrière prometteuse.

<https://doi.org/10.1051/photon/202110928>

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.

Ignace-Gaston Pardies naît le 5 septembre 1636 à Pau. Son père est Conseiller du Roi au parlement de Navarre. Il fait ses études au collège des jésuites de la ville, où il bénéficie du système éducatif jésuite qui vient de se mettre en place dans toute l'Europe catholique. Théorisé dans le « *Ratio Studiorum* » et porté par la contre-réforme, ce nouveau système éducatif propose une approche globale de formation des élites, et non pas uniquement religieuse. Une part importante de l'enseignement est dédiée aux sciences. Pardies commence son noviciat dans la compagnie de Jésus en 1652. Elève doué, il est vite attiré par les sciences mathématiques et physiques. Il embrasse la carrière d'enseignant et, professeur brillant et pédagogue apprécié, il en gravit tous les échelons dans les différents collèges jésuites, à Pau, Toulouse, La Rochelle, Bordeaux. Malgré une lourde charge d'enseignement, il s'intéresse au développement des sciences physiques et astronomiques. Grâce

à une correspondance active et à la publication de nombreux ouvrages, il s'inscrit dans la lignée internationale des scientifiques jésuites, comme Kircher, Fabri et Grimaldi. Il participe activement au réseau d'échange de correspondance mis en place au niveau européen par H. Oldenbourg. Il est ainsi rapidement remarqué et apprécié par la communauté scientifique internationale. Il correspond et argumente avec de nombreux physiciens, notamment avec Huygens, Leibniz et Newton (qui l'appréciait fort). Il poursuit en parallèle ses études de théologie et prononce ses vœux en 1663. En 1670, il est nommé professeur à Paris au prestigieux collège de Clermont, notre actuel lycée Louis le Grand, où il enseigne les mathématiques. Il installe dans cet établissement un petit observatoire, et un cadran solaire qui existe encore aujourd'hui. Il publie en 1671 un ouvrage d'enseignement « *Éléments de Géométrie* », loué pour sa clarté, traduit en de nombreuses langues et réédité à de

DATES CLÉS

1636 : naissance à Pau	1652 : novice chez les jésuites	1654-1656 : études de théologie et mathématiques	1660-1670 : enseigne les humanités au collège de Bordeaux	1670 : nommé professeur au collège de Clermont à Paris. Manuscrit « sur le mouvement d'ondulation », perdu par la suite
----------------------------------	---	--	---	---

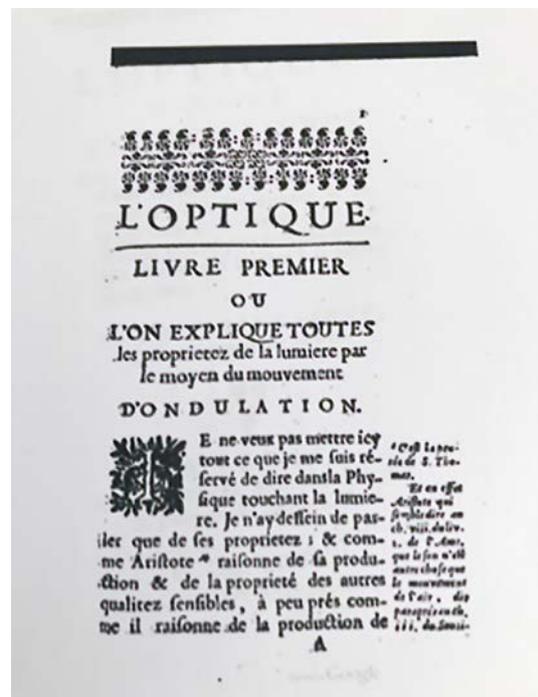
multiples reprises jusqu'au milieu du XVIII^e siècle. Il entreprend tout d'abord des recherches en astronomie : il s'intéresse aux cadrans solaires, aux horloges et à la trajectoire des comètes. Son « *Horologium thaumanticum duplex* » paraît en 1662. En 1670 il publie à Bordeaux son « *Discours du mouvement local* », influencé par Descartes, apprécié par Huygens mais pas par l'Église, qui vient de mettre à l'index les écrits de Descartes. Pardies, taxé de cartésianisme, s'en défend dans des « *Remarques* », où il démontre, à juste titre, la fausseté de certaines des affirmations de Descartes concernant le choc des corps. Il publie aussi un « *Discours de la connaissance des bêtes* », où il réfute la conception Cartésienne de l'animal-machine tout en montrant une certaine empathie pour les positions de Descartes. Il publie en 1673 une « *lettre d'un philosophe à un cartésien de mes amis* ». Il continue à s'intéresser à la Mécanique, publiée en 1673 « *Statique, ou la science des forces mouvantes* », et envisage un ouvrage général sur ce sujet. Mais c'est dans le domaine de l'optique que sa contribution est la plus novatrice. Commençons par dresser un rapide tableau de l'état des connaissances en optique à l'époque du père Pardies. La Nature de la lumière fait en effet depuis l'antiquité l'objet de conjectures. Celles-ci sont généralement assez vagues, peu étayées, basées sur des analogies qualitatives et de simples observations, mais rarement sur de véritables expériences. Descartes envisage la lumière comme une pression se transmettant dans un milieu rigide remplissant l'espace. Il propose plusieurs « modèles », ou « images », pour la lumière, preuve qu'il n'en prenait aucun vraiment au sérieux. Utilisant la « loi des sinus » qu'il a re-découverte après Snell, Descartes peut expliquer quantitativement la présence et la dimension des deux arcs dans l'arc-en-ciel.

Hooke en 1665 envisage la lumière comme une succession d'impulsions causées par la vibration de la source lumineuse et se propageant à vitesse finie, comme les ronds dans l'eau provoqués par l'impact d'une pierre lancée. Il utilise à plusieurs reprises l'analogie entre lumière et son, reprise aussi par l'architecte et physicien Claude Perrault. Dans l'esprit de ces savants, et de l'ensemble de la communauté scientifique, cette analogie est essentiellement qualitative, car les propriétés du son, et plus généralement

des phénomènes ondulatoires, ne sont pas mieux comprises à cette époque que celles de la lumière. Ils ignorent évidemment la grande découverte de Fourier, qui est la possibilité de décomposer une onde en composantes « pures ». Les concepts de fréquence et de longueur d'onde, et évidemment de phase et d'interférence, ne sont pas encore clairement dégagés. Un autre père jésuite, Francesco Grimaldi, effectue des expériences extrêmement délicates qui lui permettent de mettre en évidence le phénomène qu'il appelle « *diffraction* » dans son traité de 1665. Pour lui, la lumière est le mouvement d'ondulation d'un fluide. Ce mouvement existe aussi derrière un obstacle.

Pardies, dans ce contexte, est le premier à baser sa conception de la lumière sur une utilisation systématique de l'analogie avec l'onde sonore. Il fait ainsi progresser la compréhension des deux phénomènes, envisagés comme des ondes de compression se propageant de proche en proche, sans transfert de matière dans la direction de propagation.

Figure 1. Première page du livre « L'optique » (1682) écrit par Pierre Ango à partir d'un traité inachevé de G.I. Pardies. Wikipedia



1671 :
 « *Éléments de géométrie* »

1672 :
 « *Lettre d'un philosophe à un cartésien de mes amis* »

1673 :
 « *L'Atlas Céleste* »

1673 :
 décès à Paris

1682 :
 « *L'Optique* »

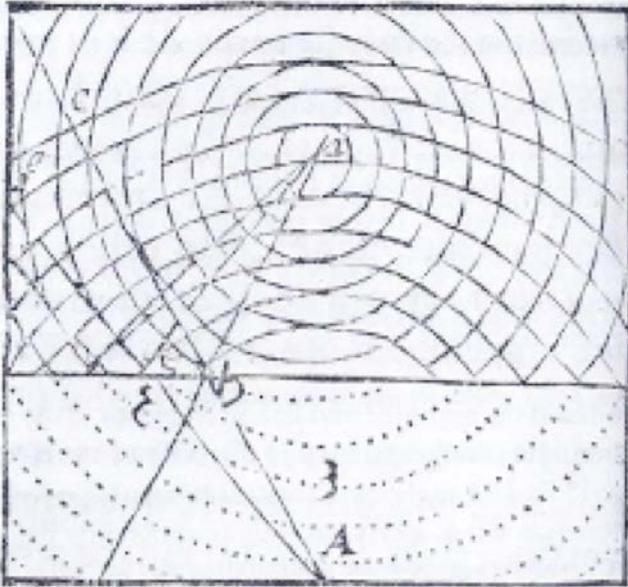


Figure 2. Les ondes circulaires, issues du point a en haut de la figure, semblent, après réflexion sur le mur, être issues d'un nouveau centre A. Tiré de: P Ango : L'optique (wikipedia).

Il utilise aussi l'analogie avec l'onde qui se propage sur une corde agitée périodiquement à son extrémité. En s'appuyant encore une fois sur l'image des « ronds dans l'eau », il explique la réflexion de l'onde sur un mur (voir figure), la propagation rectiligne des éléments de ces « ronds », l'indépendance de deux ondes qui se rencontrent (notre principe de superposition). Il distingue deux phénomènes, l'un concernant la « vibration », qui est une oscillation temporelle, et l'autre son « ondulation », c'est-à-dire sa propagation de proche en proche dans le milieu. Par contre il n'est pas en mesure d'expliquer les couleurs, qu'il envisage comme un mélange variable de blanc et de noir. Dans le traité d'Ango/Pardies, on trouve l'affirmation que la fréquence de l'onde est une des propriétés liées à la couleur, mais pas la seule. On trouve dans cet ouvrage des figures de réflexion et de réfraction d'onde à l'interface entre deux milieux qui rappellent celles bien connues de Huygens.

Pardies envoie en 1670 une ébauche de son « discours sur le mouvement d'ondulation » à Huygens. Ce traité est pour le savant hollandais, qui le reconnaît, une source importante d'inspiration dans sa conception de la lumière, qu'il publie bien plus tard, en 1690. Pour Huygens, la lumière est une onde de compression se propageant à vitesse finie en surfaces sphériques à partir de sources élémentaires. Ces ondes sont des impulsions de faible extension, pas des ondes « monochromatiques » : l'analogie avec les « ronds dans l'eau » est encore ici très présente. Le grand mérite d'Huygens est d'avoir mené, à partir

de son intuition des sources secondaires dont les effets se renforcent dans certaines directions, des démonstrations géométriques rigoureuses capables d'expliquer l'essentiel des phénomènes lumineux (y compris la propagation rectiligne et la double réfraction). Par contre il n'utilise nulle part les notions de fréquence et de longueur d'onde, et il ne s'appuie pas non plus sur le phénomène de diffraction découvert par Grimaldi, qu'il connaît pourtant. Ses ondes sont encore très éloignées de la conception qu'en auront, à l'orée du XIX^e siècle, Young puis Fresnel.

Pardies décède le 21 avril 1673, à 36 ans, des suites d'une fièvre contractée en visitant les malades à l'hospice de Bicêtre.

Son « Atlas céleste » sera publié quelques mois plus tard à titre posthume. Le père Pardies a écrit de nombreuses publications sur un grand nombre de sujets, mais il n'a pas publié de traité synthétique sur ses travaux scientifiques, notamment ceux concernant l'optique. Son ouvrage « sur le mouvement d'ondulation », dont une ébauche a été écrite en 1670, a été perdu. On ne connaît ses travaux sur l'optique que de manière indirecte, par les commentaires de ses confrères, mais surtout par la publication en 1682 par le père jésuite Pierre Ango, 9 ans après le décès de Pardies, de l'ouvrage « L'optique » (voir figures). Ango écrit dans son introduction : « le père Pardies, dont j'avoue que j'ai tiré une partie de ce qu'il y a de meilleur dans le traité qu'il avait commencé peu de temps avant sa mort et qui m'est tombé ensuite entre les mains sans être achevé... ». Huygens a des mots très durs à ce propos : (Ango) « aurait mieux fait de publier le manuscrit de Pardies tel quel ». Le décès du père Pardies à l'âge de 36 ans a prématurément interrompu une carrière brillante et prometteuse, à l'égal des plus grands scientifiques de son époque. Comme il n'a pas écrit de grand traité d'optique, à l'instar de l'« Optique » de Newton, ou du « Traité de la lumière » de Huygens, ses travaux sont tombés dans un oubli injuste et immérité. ●

BIBLIOGRAPHIE

Histoire générale des Sciences, Tome 2, IV-II, sous la direction de René Taton, Presses Universitaires de France (1964)

A Ziggelaar, *Le physicien I.G. Pardies (1636-1673)*, Odense University Press (1972)

F. Baskevitch, *Le son et l'analogie des ronds dans l'eau*, thèse (2008-2016)

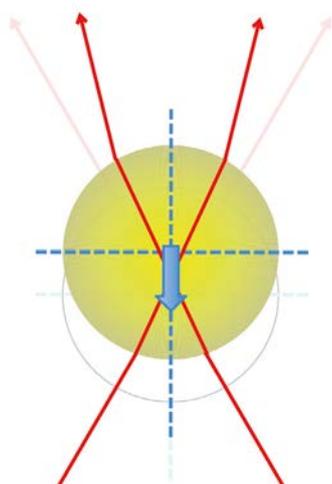
O. Darrigol, *A history of optics, from greek antiquity to the XIXth century*, Oxford University Press (2012)

LA PINCE OPTIQUE : UN OUTIL INTERDISCIPLINAIRE

Nathalie WESTBROOK¹, Christoph I. WESTBROOK¹

¹ Université Paris-Saclay, Institut d'Optique Graduate School, CNRS, Laboratoire Charles Fabry, 91127 Palaiseau CEDEX, France

* nathalie.westbrook@institutoptique.fr



L'invention de la pince optique, c'est l'histoire d'un chercheur qui s'amuse mais qui avance méthodiquement et patiemment pour améliorer un concept simple jusqu'à en faire un outil indispensable dans deux domaines de recherche très différents. En biologie et en physique atomique, la pince optique est devenue un instrument de laboratoire courant.

<https://doi.org/10.1051/photon/202110931>

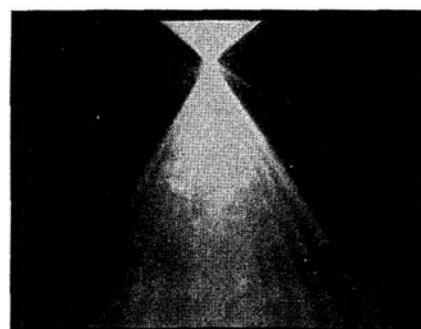
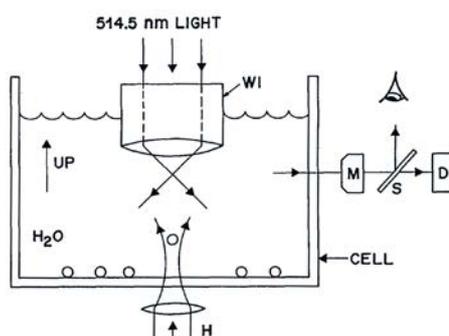
Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation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

Au moment où il obtient le prix Nobel en 2018, Arthur Ashkin, 96 ans, en est le récipiendaire le plus âgé. Son état de santé ne lui permettant déjà plus de voyager, il ne peut se déplacer à Stockholm pour recevoir lui-même le prix, et *a fortiori* se déplacer ensuite à travers le monde pour des conférences présentant les pinces optiques et leurs applications en biologie, découverte pour laquelle le prix lui est attribué. Cet état de fait, ainsi que le fait que la même année un chercheur français fait également partie des lauréats, rend cette découverte moins visible, aux yeux du public français en particulier. Pourtant les travaux d'Ashkin sur le piégeage optique donnent un exemple très intéressant d'interdisciplinarité et ils ont eu une portée capitale dans deux domaines

apparemment très différents, la physique atomique et la biologie. Ashkin lui-même s'est intéressé dès le début à ces deux voies de développement. Son approche expérimentale est particulièrement intéressante à raconter dans le cadre de ces « expériences marquantes ».

L'aventure commence avec un premier article publié par Ashkin seul, en 1970 [1]. Il a déjà été relaté qu'Ashkin avait reçu un avis défavorable pour la soumission de ce papier à *Physical Review Letters*, de la part d'un comité interne à *Bell Labs*, qui ne le jugeait pas assez original ●●●

Figure 1. Extrait de l'article d'Ashkin de 1986. À gauche, le schéma de l'expérience : un laser auxiliaire (H) amène des billes de verre vers le foyer de l'objectif de microscope à immersion dans l'eau (W1). Le piégeage est observé sur le côté par un autre objectif (M). À droite : image en fluorescence des rayons déviés par une bille dans le piège. Source : référence [2], adapté avec autorisation © The Optical Society.



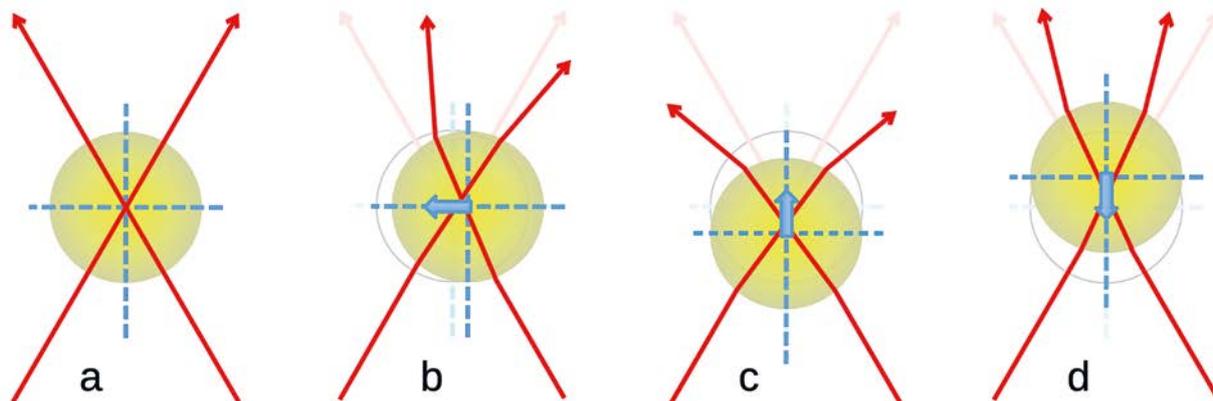
pour être soumis à cette revue, la plus prestigieuse à l'époque pour les publications en physique. Encouragé par son supérieur direct à passer outre cet avis, Ashkin en obtient la publication sans difficulté, et cet article fait maintenant partie des articles les plus cités de *Physical Review Letters*. Rendons tout de même justice aux *Bell Labs* qui, à cette époque, encouragent tous leurs chercheurs à avoir une activité de recherche à côté de leur activité principale afin de ne pas s'enfermer dans un seul domaine. Cela correspondait très bien à l'état d'esprit d'Ashkin qui a pu développer cette activité sur le piégeage, en parallèle de ses travaux principaux sur les lasers et l'optique non linéaire.

Mais revenons au contenu de ces premières expériences : Ashkin y démontre, sur des billes micrométriques plongées dans l'eau, l'effet d'accélération dans la direction de

propagation du faisceau et, plus remarquablement, l'attraction des billes vers le centre d'un faisceau gaussien. Il explique cette attraction par la déviation des rayons lumineux par la bille qui est accompagnée d'un transfert d'impulsion lumineuse (voir encart sur le principe du piégeage). Il montre que la force s'inverse pour une bulle d'air à cause de son indice inférieur à celui du liquide qui l'entoure. Il va même introduire un 2^e faisceau laser se propageant en sens inverse, pour contrer l'accélération et obtenir un piégeage des billes en 3 dimensions. Même si dans cet article Ashkin se concentre surtout sur la pression de radiation, cherchant notamment à prouver qu'il ne s'agit pas d'un effet thermique dû à l'échauffement de l'eau autour des billes, l'effet de piégeage latéral dû au gradient d'intensité est déjà là. Après ce premier article, Ashkin poursuit

ses expériences de piégeage de billes dans l'eau, cherchant à en réduire la taille pour s'approcher du cas des atomes, tout en explorant théoriquement les possibilités du piégeage et du refroidissement d'atomes. En 1986, il publie dans *Optics Letters* [2], avec plusieurs co-auteurs dont Steven Chu (co-lauréat du prix Nobel en 1997 pour la manipulation d'atomes par laser), la première réalisation expérimentale d'un piège stable à trois dimensions en utilisant un seul faisceau laser, focalisé à l'aide d'un objectif de microscope immergé dans l'eau (voir Fig. 1). C'est cette focalisation qui produit un gradient d'intensité suffisant dans la direction longitudinale pour contrer la poussée dans la direction de propagation du faisceau. Les auteurs montrent qu'ils peuvent ainsi piéger des billes de 10 μm de diamètre jusqu'à des tailles aussi petites que 25 nm. Cette configuration

PRINCIPE DE LA PINCE OPTIQUE



Cette illustration s'inspire de l'interprétation en termes de rayons donnée par Ashkin lui-même, qui s'applique bien au cas d'une bille grande devant la longueur d'onde. Pour simplifier, on montre uniquement la déviation des rayons due à la réfraction, en négligeant la réflexion du faisceau par les surfaces. a) La bille est centrée au point de convergence du faisceau laser (rouge) focalisé. Les rayons ne sont pas déviés, la force est nulle. b) La bille est déplacée vers la droite. Les rayons sont réfractés vers la droite, donnant lieu à un transfert d'impulsion du laser vers la bille qui la ramène vers la gauche. c) La bille est déplacée vers le bas. Les rayons sont déviés vers l'extérieur donnant un transfert d'impulsion vers le haut. d) La bille est déplacée vers le haut. Les rayons sont rabattus vers l'axe optique, et le transfert d'impulsion se fait vers le bas. Dans tous les cas, la force est dirigée vers le point de focalisation du laser. L'effet de la réflexion par les surfaces ajoute une force dans la direction moyenne de propagation de la lumière. Pour une focalisation suffisamment forte, la force due à la réfraction domine la force due à la réflexion (pression de radiation) et le piège est stable.

très simple est aujourd'hui la plus utilisée pour ce qu'on a maintenant coutume d'appeler les pinces optiques, notamment en biologie. Cette expérience va marquer toute la recherche future sur les pinces optiques, d'ailleurs cet article est cité plus de 4500 fois (un record absolu pour *Optics Letters*), tant par des biologistes que par des physiciens. Il est intéressant de noter que dans cet article, les auteurs citent un certain G. Roosen : il s'agit bien de Gérard Roosen, chercheur à l'Institut d'Optique, et qui avec Christian Imbert s'est intéressé lui aussi aux effets mécaniques de la lumière sur de petits objets diélectriques, biréfringents ou métalliques, en particulier dans l'idée de tenir en lévitation des cibles contenant du deutérium tritium pour l'étude de la fusion nucléaire [3].

Ce piégeage à un seul faisceau focalisé débouche la même année sur la réalisation du premier piège laser à atomes neutres. Le piégeage des atomes neutres était, depuis le début de ses travaux, l'une des préoccupations d'Ashkin. Cependant, la faible profondeur de ce piège ne permettait pas de capturer des atomes à température ambiante. Il a donc fallu attendre le développement des méthodes de refroidissement d'atomes par laser, auxquelles Ashkin contribue également, pour que ce piège optique prenne toute sa place.

Pour piéger des objets dans l'eau, et en particulier des objets biologiques, la difficulté n'est pas la même, et Ashkin poursuit, avec son collaborateur Joseph Dziedzic, ses expériences dans ce domaine « avec les moyens du bord », beaucoup moins complexes que les expériences sur les atomes. C'est ainsi qu'il publie en 1986 et 1987, deux articles assez courts qui décrivent des expériences amusantes sur plusieurs objets biologiques. Intéressé au départ par le piégeage du virus de la mosaïque du tabac, très petit donc plutôt difficile à piéger, il s'aperçoit qu'il piège très facilement d'autres objets spontanément présents, qu'il identifie rapidement comme étant des bactéries. Son objectif étant au départ de piéger des objets de plus en plus petits, pour lesquels la force exercée par le laser est très faible, il travaille avec le laser puissant le plus courant à l'époque, le laser à argon, et en particulier la raie verte à 514 nm. Il constate alors que ce laser de plusieurs centaines de milliwatts, focalisé sur quelques microns, produit des dommages sur les objets qu'il cherche à piéger : petites billes de latex ou petits objets biologiques. Il a déjà l'idée qu'en passant dans le proche infrarouge les dommages seront moins importants, idée essentielle pour toute la suite des applications en biologie. C'est ainsi qu'il passe au laser Nd:YAG à 1,06 μm et qu'il observe pendant plusieurs heures la division de cellules de levure piégées dans son faisceau laser ou qu'il s'amuse à déplacer des éléments à l'intérieur de cellules de plantes qu'il a collectées dans la mare derrière le labo. Ce côté ludique se ressent particulièrement à la lecture de ces différents articles, qui bien que publiés dans des revues prestigieuses revendiquent le côté qualitatif des expériences réalisées. On peut ainsi lire dans ●●●

DÉCOUVREZ NOS NOUVEAUX PRODUITS POUR L'OPTO-PYROTECHNIE



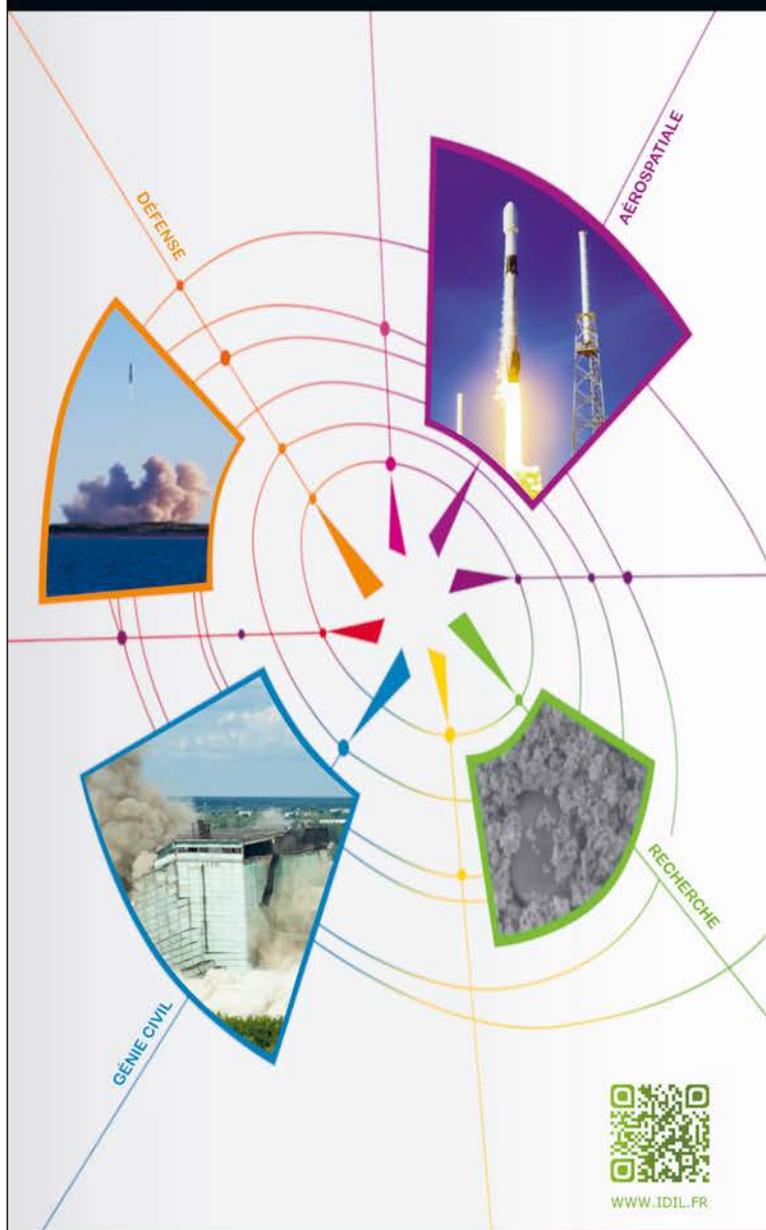
LFU

Laser de mise à feu



OH

Harnais optique



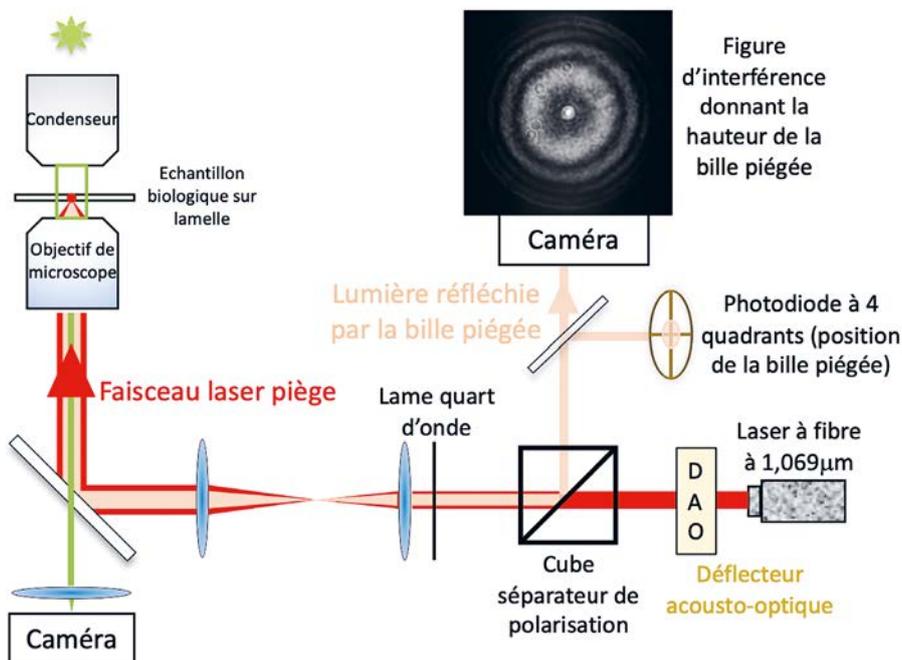


Figure d'interférence donnant la hauteur de la bille piégée

l'article publié dans Proceedings of the National Academy of Sciences en 1988, dans ce qui aujourd'hui s'appellerait « *materials and methods* » : « *Samples of Spirogyra and water-net (Hydro-dicton) algae cells were collected from the back pond of the AT&T Bell Laboratories at Holmdel. Scallion (Allium Cepa) cell samples came from a local supermarket* ». Tout en étant qualitatif et empirique, Ashkin imagine déjà des domaines d'application qui se développeront en biologie par la suite : la mesure de viscosité par exemple, qu'il met en évidence en observant le retour partiel à la position initiale d'un organite à l'intérieur d'un protozoaire.

L'intérêt des pinces optiques pour la biologie démarre plus doucement que du côté des physiciens atomistes, et pendant quelques années Ashkin est le seul à poursuivre dans cette voie. À partir de 1989, d'autres chercheurs s'en saisissent pour étudier la motilité des bactéries ou l'élasticité de l'ADN. Suivront des expériences remarquablement précises et difficiles qui étudient le mouvement de moteurs moléculaires intracellulaires, kinésine, myosine, ribosome avec des résolutions de moins d'un nanomètre dans

Figure 2. Schéma d'une pince optique au Laboratoire Charles Fabry avec détection en réflexion.

les mesures de déplacement [4]. À côté de ces tours de force, les applications en biologie se développent, avec des systèmes commerciaux visant la fécondation *in vitro* (en piégeant des spermatozoïdes) ou le tri cellulaire. Au Laboratoire Charles Fabry, nous les utilisons actuellement pour mesurer la viscosité de caillots sanguins dans lesquels sont insérées des billes micrométriques, et ainsi contribuer à une meilleure

compréhension de la thrombose. La figure 2 montre un schéma de l'expérience.

Du côté de la physique atomique, le « piège optique dipolaire » pour des atomes froids est aussi très répandu. Les chercheurs piègent aussi bien des condensats de Bose-Einstein pour étudier la matière condensée que des atomes individuels pour des applications à l'information quantique. La flexibilité des systèmes de modulation temporelle et spatiale de la lumière permet de réaliser des pièges variables dans le temps et des configurations complexes où une centaine de tels pièges sont réalisés simultanément [5].

L'esprit de simplicité qui fait la beauté de cette expérience marquante réalisée par Arthur Ashkin se retrouve aujourd'hui dans sa mise en œuvre pédagogique dans de nombreux travaux pratiques à travers le monde. Vous pouvez, vous aussi, acquérir une version pédagogique en kit, vous inspirer des publications décrivant des montages de pinces optiques à destination d'étudiants de licence, ou même réaliser des expériences virtuelles avec de l'ADN ou des moteurs moléculaires [6]. Chaque année, au laboratoire d'enseignement expérimental de l'Institut d'Optique, nous piégeons ainsi des cellules de levure de boulanger, dans lesquelles viennent souvent, comme dans les expériences d'Ashkin, s'inviter quelques bactéries. ●

RÉFÉRENCES

- [1] A. Ashkin, Phys. Rev. Lett. **24**, 156 (1970)
- [2] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, and S. Chu, Opt. Lett. **11**, 288 (1986)
- [3] G. Roosen, Effets mécaniques de la lumière: Étude théorique, expérimentale et applications, Thèse, Université de Paris XI (1978)
- [4] Nobel Committee, Nobel Prize Background 2018, <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/10/advanced-physicsprize2018.pdf>
- [5] A. Browaeys, Reflets de la Physique, N°47-48 36-40 (2016)
- [6] Pour les simulations pédagogiques, voir le site PhET de l'Université du Colorado à Boulder: <https://phet.colorado.edu/fr/simulation/legacy/optical-tweezers>