

Photoniques

LA LUMIÈRE ET SES APPLICATIONS

ENTRETIENS

Philippe Lalanne
Jean-François Vinchant

FOCUS

Bourgogne
Franche-Comté

COMPRENDRE

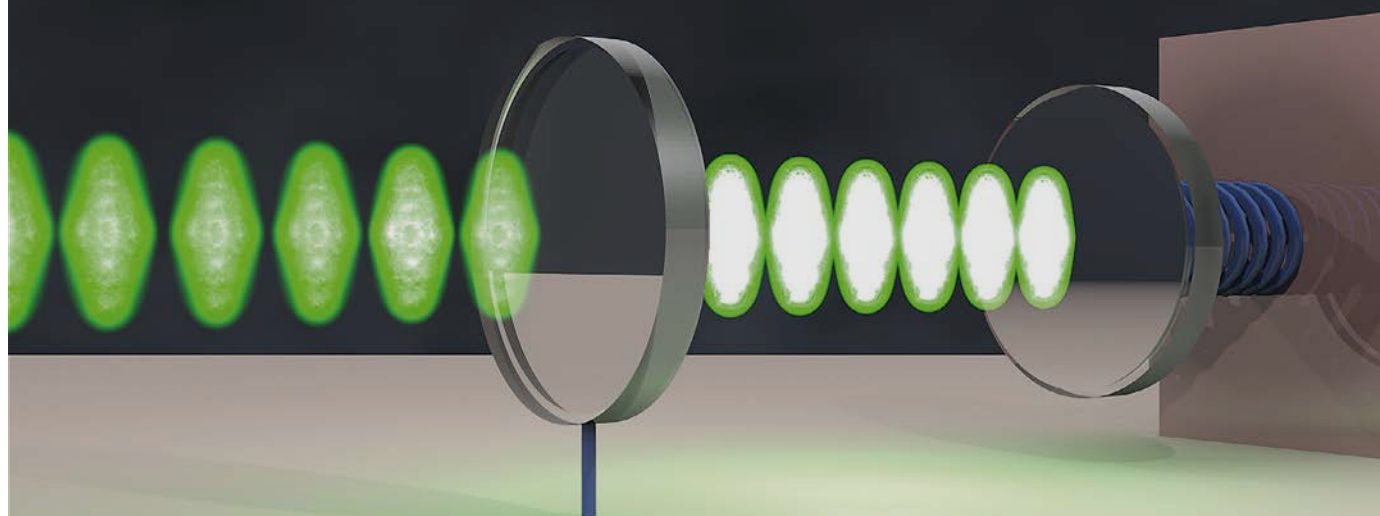
Les forces
optiques

ACHETER

Une détection
synchrone

DOSSIER

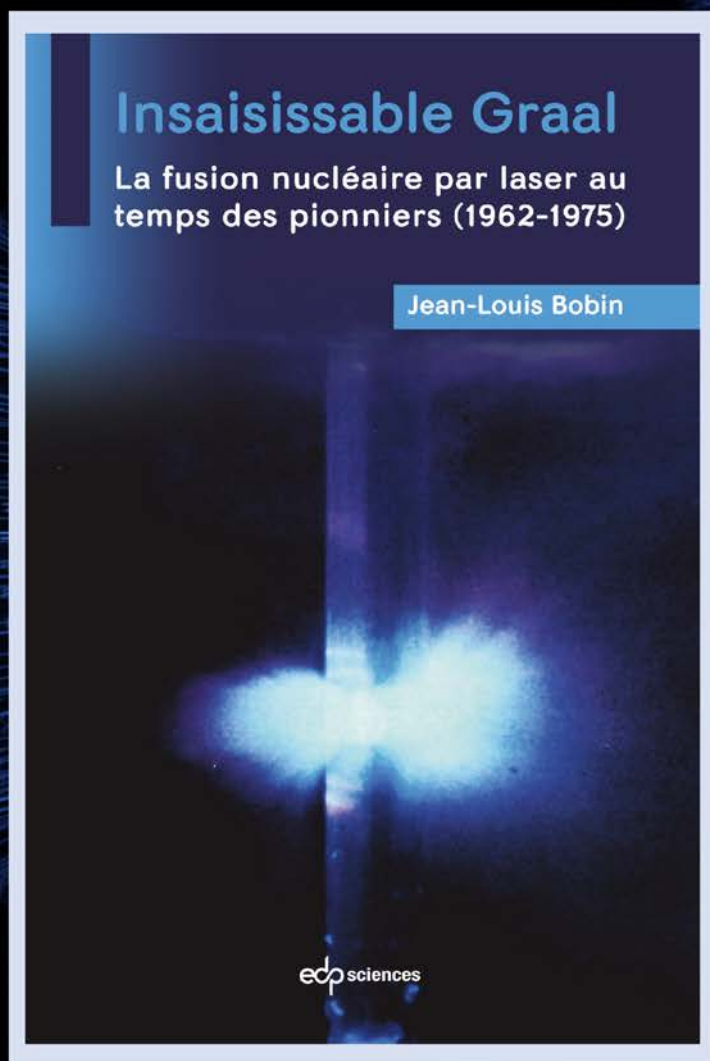
OPTOMÉCANIQUE



- Optomécanique : science et capteurs
- De la détection des ondes gravitationnelles à l'optomécanique quantique
- Explorer la nano-optomécanique avec des nanofils suspendus
- Nano-oscillateur électro-optomécanique à boucle fermée pour la photonique micro-onde intégrée

La fusion nucléaire par laser au temps des pionniers

Par Jean-Louis Bobin



216 pages

ISBN : 978-2-7598-3060-2

Prix : 19 €

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

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



Photoniques est éditée par la Société Française de Physique, association loi 1901 reconnue d'utilité publique par décret du 15 janvier 1881 et déclarée en préfecture de Paris.

<https://www.sfpnet.fr/>

Siège social : 33 rue Croulebarbe,
75013 Paris, France
Tél. : +33(0)1 44 08 67 10

CPPAP : 0124 W 93286

ISSN : 1629-4475, e-ISSN : 2269-8418

www.photoniques.com

Le contenu rédactionnel de Photoniques est élaboré sous la direction scientifique de la Société française d'optique
2 avenue Augustin Fresnel
91127 Palaiseau Cedex, France
Florence HADDOUCHE
Secrétaire Générale de la SFO
florence.haddouche@institutoptique.fr

Directeur de publication

Jean-Paul Duraud, secrétaire général de la Société Française de Physique

Rédaction

Rédacteur en chef

Nicolas Bonod

nicolas.bonod@edpsciences.org

Journal Manager

Florence Anglézio

florence.anglezio@edpsciences.org

Secrétariat de rédaction et mise en page

Agence de communication la Chamade

<https://agencelachamade.com/>

Comité de rédaction

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

Advertising Manager

Bernadette Dufour

Cell phone + 33 7 87 57 07 59

bernadette.dufour@edpsciences.org

Photoniques est réalisé par

EDP Sciences,

17 avenue du Hoggar,

P.A. de Courtaboeuf,

91944 Les Ulis Cedex A, France

Tél. : +33 (0)1 69 18 75 75

RCS : EVRY B 308 392 687

Gestion des abonnements

abonnements@edpsciences.org

Impression

Fabrique imprimeur

B.P. 10

87500 Saint-Yrieix la Perche

Dépôt légal : décembre 2024

Routeage : STAMP (95)



© EDP Science/SFP à l'exception des articles publiés avec une licence CC-BY dont les droits reviennent aux auteurs.

Éditorial



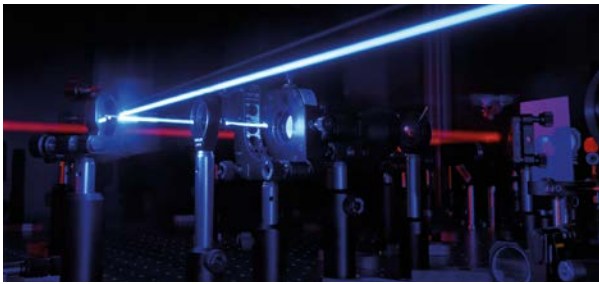
NICOLAS BONOD

Rédacteur en chef

La force de la lumière

Les études montrent année après année un décrochage en France du niveau scolaire en mathématiques et plus généralement en sciences (voir notamment la dernière enquête TIMSS). Parmi les nombreuses pistes à explorer, celle de l'éveil aux questions scientifiques reste centrale. Nous devons intensifier nos efforts pour susciter l'intérêt des plus jeunes envers les questions scientifiques. Les questions relatives à la lumière et ses technologies offrent pour cela une porte d'accès privilégiée vers les sciences. Car évoquer la lumière à un public large, c'est raconter les progrès à travers les siècles de notre compréhension sur sa nature, sur les processus complexes d'interaction avec la matière. Évoquer la lumière, c'est aussi raconter l'exploration de notre univers et du monde nano et microscopique de la matière et du vivant, c'est raconter ses promesses pour répondre aux grandes problématiques liées à la santé, l'environnement, les communications et l'énergie. C'est bien là la force de la lumière, celle de pouvoir éveiller la curiosité à la fois des plus grands scientifiques et d'un public large. Poursuivons sur le thème de la force de la lumière avec l'article dédié à la compréhension des forces optiques. Cet article relate notamment comment la pression de radiation a été prédite par Maxwell dans son célèbre "Traité sur l'électricité et le magnétisme" publié en 1873, et comment Lebedev a su confirmer dès 1901 cette prédiction dans une expérience spectaculaire de précision. Cette expérience

historique, suivie dans les années 1970 par les travaux pionniers d'Ashkin sur les pinces optiques, a ouvert la voie vers l'optomécanique, cette science basée sur l'interaction entre les mouvements de systèmes physiques avec la lumière. La pression de radiation exercée par la lumière se trouve depuis quelques années au cœur de recherches intenses dans des systèmes aux échelles très différentes, allant des miroirs de grande taille pour la détection des ondes gravitationnelles aux micro-résonateurs couplés à des cavités optiques. Les sensibilités atteintes par les résonateurs optomécaniques bouleversent aujourd'hui la métrologie et la physique quantique; l'occasion pour nous de nous tourner vers 2025. Vous le savez, 2025 est l'année internationale de la Science et de la Technologie Quantique. Le comité de rédaction a largement anticipé cet événement et a travaillé intensément afin d'identifier les thèmes et les sujets qui paraîtront en 2025. L'occasion pour moi de remercier l'ensemble des membres du comité pour leur enthousiasme et leur connaissance profonde de l'optique et photonique et de sa communauté. Photoniques ne pourrait non plus se concevoir sans l'implication déterminante des auteurs qui acceptent de dédier de leur temps précieux à la rédaction d'articles originaux et de grande qualité pour le bénéfice de toute la communauté. C'est une autre force de l'optique, celle de pouvoir compter sur une communauté scientifique impliquée et volontaire pour faire progresser les connaissances au bénéfice de toute la société.



Sommaire

www.photoniques.com

N° 129

21 FOCUS
Bourgogne-Franche-Comté :
un terroir fertile pour l'innovation



38

De la détection des
ondes gravitationnelles à
l'optomécanique quantique

56
Acheter une détection
synchrone pour
un traitement du signal
en temps-réel



ACTUALITÉS

- 03 Éditorial et actualité de la SFO
- 05 Informations partenaires
- 12 Hommage à Jean Bulabois (1937-2024)
- 14 Entretien : Philippe Lalanne
- 18 Témoignage d'entrepreneur :
Jean-François Vinchant

FOCUS

- 21 Bourgogne-Franche-Comté

OSEZ L'OPTIQUE

- 25 Le logiciel PyMoDAQ

EXPÉRIENCE MARQUANTE

- 30 La lumière : champ électromagnétique
ou pluie de photons ?

DOSSIER : OPTOMÉCANIQUE

- 33 Optomécanique : science et capteurs
- 38 De la détection des ondes gravitationnelles
à l'optomécanique quantique
- 42 Explorer la nano-optomécanique
avec des nanofils suspendus
- 47 Nano-oscillateur électro-optomécanique
à boucle fermée pour la photonique
micro-onde intégrée

COMPRENDRE

- 52 Les forces optiques

ACHERER

- 56 Une détection synchrone pour
un traitement du signal en temps-réel

PRODUITS

- 61 Nouveautés

Annonceurs

Ardop	53	HTDS	45
Edp sciences ..	13, 59, II ^e et IV ^e couv.	Imagine Optic	51
Epic	14	Opton Laser	49

Spectrogon	55
Spectros	19
Trioptics	43

Yokogawa	31
----------------	----

Crédit photo (couverture) : © Christopher Baker
et Ivan Favero, MPQ, Université Paris Cité, CNRS

L'édito de la SFO



FRANÇOIS SALIN
Président de la SFO



ARIEL LEVENSON
Président sortant de la SFO

Alain Aspect à l'honneur !

Notre dernier édito faisait la part belle aux nombreuses actions en cours et à celles qui se dérouleront tout au long de l'année 2025, que nous vous souhaitons heureuse et lumineuse ! L'espace manquait pour les relater toutes, comme une illustration de ces situations où le temps manque et nous sommes emportés par un mouvement nécessaire, mais qui nous dépasse. Permettez-nous cette fois de ralentir, car nous sommes convaincus que ces « pauses » aident à faire grandir notre SFO.

La SFO est une grande famille et nous sommes fiers d'en faire partie. Comme dans toute grande famille tous les membres ont leur place. Il y en a cependant quelques-uns dont les contributions sont particulièrement remarquables. Leur rendre hommage n'est certes pas une obligation, mais simplement une nécessité tant ils contribuent au récit collectif et à la cohésion familiale. A la SFO cette reconnaissance prend la forme du statut « Membre d'honneur », qui résulte du consensus de nos instances, Bureau et Conseil d'Administration.

Jusqu'à très récemment, nous comptions trois Membres d'honneur. Eh oui, la distinction est rare. Vous reconnaîtrez sans peine les mérites des trois. Pierre Chavel, premier secrétaire élu, membre fondateur aux côtés de notre premier président, le regretté Jean Bulaboïs. Françoise Chavel, première secrétaire générale bénévole, puis première salariée, figure indissociable de la montée en puissance de notre SFO naissante. Hervé Lefevre, membre actif des JNOG avant même la fondation de la SFO, président promoteur de notre congrès OPTIQUE.

Depuis quelques semaines, nous avons le plaisir de compter avec un quatrième membre d'honneur et non des moindres. Notre cher Alain Aspect. Faut-il présenter Alain ? Faut-il rappeler ses apports scientifiques ? Vous conviendrez que d'autres, lors de reconnaissances bien plus prestigieuses, l'ont fait mieux que nous ne le pourrions.

Au-delà de l'importance des apports scientifiques d'Alain, qui en soit constituent un emblème de la

communauté de l'optique française, ce dont nous souhaitons témoigner ici sont ses contributions à la famille SFO. Alain a été président de notre Club COLOQ, club historique dont le périmètre devenait incertain suite aux multiples succès des domaines couverts, l'optique non-linéaire, l'optique quantique, les lasers. Le succès de ces disciplines a en effet entraîné leur diffusion au sein de bien d'autres qu'elles sont venues enrichir. Ce mouvement thématique a questionné les contours du Club et même son avenir. Qui mieux qu'Alain pouvait les redessiner et relancer une nouvelle dynamique. Ce qu'il a fait de main de maître pendant ses nombreuses années de présidence de COLOQ. Plus récemment Alain a œuvré au rapprochement du prix Jean Jerphagnon, devenu désormais prix SFO, qui matérialise une des composantes de l'ADN de notre société, le continuum académie-industrie.

Mais s'il fallait garder un seul apport d'Alain à la SFO et à la communauté, nul doute qu'il s'agirait de celui effectué auprès de nos jeunes. Alain est depuis des années une figure emblématique et entraînant pour nos jeunes. Pas une figure distante, mais de celles que l'on admire encore plus au contact, lors d'un échange après une conférence, au détour d'un pot, ou d'un entretien d'une heure par les membres du Club Jeunes comme aux JNOG 2023. Une figure à l'enthousiasme communicatif, qui déclenche, entretient et relance les vocations pour l'optique, toute l'optique qu'elle soit classique ou quantique.

Nous n'avons que trop tardé à t'honorer, cher Alain, nouveau Membre d'honneur de la SFO!

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

C'est avec une immense joie que nous annonçons la nomination d'Alain Aspect, prix Nobel de Physique 2022 en tant que membre d'honneur de la SFO. Entouré d'opticiens, Alain a reçu son trophée dans une atmosphère empreinte de magie, évoquant l'émerveillement suscité par son expérience historique de 1982.

Cette soirée exceptionnelle, placée sous le signe de jumelage entre science et magie, a été magnifiquement enrichie par la présence du maître illusionniste Gaëtan BLOOM, véritable créateur d'univers enchantés, et de Céline NOULIN, conférencière inspirante et Responsable culturelle de la Maison de la Magie Robert HOUDIN à Blois. Leur contribution a sublimé cet événement mémorable, illuminant ce lundi 2 décembre.

JNOG Montpellier 2025

42^e Journées Nationales d'Optique Guidée

Du lundi 7 au jeudi 10 juillet 2025, Sète, une station balnéaire idyllique 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, de l'instrumentation optique et de l'intelligence artificielle. Pour cette édition de nouvelles thématiques seront abordées :

- Packaging
- Moyen infra-rouge et THz en optique guidée
- Optique guidée pour l'agriculture et l'environnement
- Techniques quantiques et optique guidée

Les chaires Christelle BRIMONT (L2C, Laboratoire Charles Coulomb) & Stéphane BLIN (IES, Institut d'Electronique et des Systèmes) portent la mobilisation de toute la communauté JNOG pour élaborer le programme scientifique de grande qualité et nous pouvons vous dévoiler dès maintenant et en avant-première nos cinq premiers grands conférenciers :



Nous encourageons vivement la participation des doctorantes et doctorants et des jeunes chercheuses et chercheurs qui peuvent ainsi y faire leurs premières armes de conférenciers, ainsi qu'échanger avec leurs pairs et les scientifiques plus expérimentés.

Rejoignez nos experts pour un Oral ou un Poster et soumettez votre communication avant le 02 février 2025. Plus de 150 chercheurs et industriels sont attendus à Sète.

Un espace d'expositions industrielles constitue également un terrain propice aux échanges entre industriels et opticiens. La présence de start-ups est fortement encouragée.

Nous remercions le soutien du Laboratoire Charles Coulomb (L2C), l'Institut d'Electronique et des Systèmes (IES), l'Université de Montpellier, de l'INRAE et du PEPR Electronique pour sa participation à ces journées scientifiques.

Nous remercions également nos sponsors et membres collectifs de la SFO pour leur participation à ce grand colloque en tant qu'exposants : Dimione, FC EQUIPEMENTS, OPTOPRIM, OBS FIBER, OPTON LASER, THORLABS, WAVETEL et NKT PHOTONICS.

Rejoignez nos exposants et réservez un stand avant le 15 janvier 2025 au Tarif Earlybird.

Cette quarante-deuxième édition des Journées Nationales d'Optique Guidée de la Société Française d'Optique aura le plaisir d'accueillir la cérémonie de remise des Prix Jean Jerphagnon, dont le Jury prestigieux est présidé par le prix Nobel de Physique 2022, Alain Aspect.

Ce prix est attribué chaque année à un chercheur, un entrepreneur ou à un ingénieur qui propose un projet innovant à grande valeur scientifique ou à fort potentiel industriel, comportant au moins un élément d'optique ou de photonique, et marquant une étape dans sa carrière. La vocation de ce prix est d'aider et de favoriser les démarches innovantes.

Déposez vos candidatures avant le 28 février 2025.

AGENDA

■ **40 ans des boîtes quantiques épitaxiées**
Hommage à Jean-Yves MARZIN
23 et 24 janvier 2025
C2N, Palaiseau

C'NANO 2025
18 au 21 mars 2025
Cité des sciences, Paris

École Lithium Niobate
12 au 23 mai 2025
The Houches Physics School, France
70 participants attendus

École LIDAR
15 au 20 juin 2025
OHP, Observatoire de Haute Provence, France
40 participants attendus

École SEL2025
18 au 29 Août 2025
Banyuls-sur-Mer, France

JNOG Montpellier 2025
07 au 10 Juillet 2025
Sète
+ 160 participants attendus

OPTIQUE BFC 2026
06 - 10 juillet 2026
Dijon - Palais des congrès
+ 700 participants attendus

[COSMETIC 360]

Systematic Paris-Region à l'honneur sur Cosmetic 360 !



Le mois dernier, la Région Ile-de-France et Systematic étaient présents sur le salon COSMETIC 360 !

Lancé en 2015 par le pôle de compétitivité Cosmetic Valley, COSMETIC 360 est le salon mondial de l'innovation pour la filière parfumerie-cosmétique. Cet événement qui se déroule chaque année

en octobre au Carrousel du Louvre à Paris, vise à réunir les décideurs autour des dernières avancées technologiques, des tendances émergentes et des innovations pour l'ensemble de la filière.

Cette année notre présence sur le salon a permis à nos membres : AT BLOCKCHAIN SOFTWARE, Datategy, Scortex, Tower Farm R&D, Beink Dream; d'exposer et de faire découvrir leurs dernières innovations !

[COLLABORATION]

Polytec France & Emberion



Polytec France vient de signer une nouvelle collaboration avec la société Emberion.

La division photonique & vision de Polytec France pourra désormais proposer une gamme complète de solutions caméras, du visible à l'infrarouge (du SWIR jusqu'au LWIR), pour toutes les applications d'inspection et de contrôle qualité sur ligne de production ainsi que les applications nécessitant des caméras embarquées (Défense, Aerospace, Automobile).

[PhotonHub]

PhotonHub et Tech Tour

Tech Tour et PhotonHub Europe lancent le PhotonHub Scaling Club.



Ce club réservé aux membres sélectionnera et engagera 10 membres d'entreprises technologiques ambitieuses qui évolueront à 2 niveaux combinés :

- La croissance et la valeur de leur entreprise grâce à des investissements accélérés, des partenariats et un leadership

- La ou les solutions technologiques basées sur les PIC (Photonics Integrated Circuits) du TRL 4

>> La deadline pour postuler est fixée au 29 novembre 2024

En bref

Prix de l'Innovation en photonique Hamamatsu :

Les Photonics Innovation Awards constituent une passerelle vers la transformation de concepts en solutions concrètes, en tirant parti de la technologie photonique. Hamamatsu Photonics fait appel à des esprits visionnaires pour soumettre des propositions qui exploitent la photonique pour résoudre les problèmes urgents d'aujourd'hui : de la durabilité environnementale aux solutions de soins de santé avancées.

>> La deadline est fixée au 8 avril 2025

>> Les gagnants recevront un prix de 10000 € en espèces ainsi qu'un an de soutien promotionnel

AGENDA

■ **Photonics Excellence Day**
5 décembre 2024, au
Bâtiment 503 - Institut
d'Optique à Orsay.

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

CONTACT

Vous souhaitez rejoindre le Hub Optics & Photonics Systematic ?
Une question ?
Un renseignement ?

Contactez Najwa Abdeljalil,
Coordinatrice du Hub :
najwa.abdeljalil@systematic-paris-region.org



Les dernières avancées technologiques en matière de contrôle et métrologie optique

ALPHA-RLH, en partenariat avec Photonics France, a rassemblé experts industriels et scientifiques les 13 & 14 novembre 2024 pour deux journées consacrées au contrôle et à la métrologie optique, organisées au Cockpit à Mérignac.

100 personnes ont pu assister à des conférences sur le contrôle dimensionnel, la mesure des états de surface, la caractérisation physico-chimique des matériaux et la vision industrielle, outils optiques largement déployés dans l'industrie, la santé, l'aérospatial, la défense, le naval ou encore l'automobile.

Un espace exposants a permis à 10 entreprises de présenter leurs technologies et produits.



L'évènement s'est clôturé par la visite d'installations et ateliers d'ArianeGroup et de Sabena Technics.

Merci à nos sponsors Saint-Gobain, CEA, OptoSigma, Mahr et Digital Surf pour leur précieux soutien.

LES DEEP TECH POUR RELEVER LES DÉFIS DE DEMAIN

La 9^e édition d'INPHO Venture Summit s'est déroulée les 24 et 25 octobre 2024 au Palais de la Bourse à Bordeaux. Elle a réuni 180 acteurs de l'innovation et des deep tech : fonds d'investissement, industriels et startups.

Organisé par le pôle ALPHA-RLH, l'expert en innovation BLUMORPHO et le CEA, l'évènement avait pour objectif d'identifier des opportunités de collaborations et de financement pour les technologies de rupture, d'échanger sur les grandes tendances autour des technologies quantiques, de la cybersécurité, de l'énergie (fusion nucléaire), de la santé, du climat... qui visent à relever les défis majeurs de notre monde.

INPHO 2024, ce sont plus de 30 intervenants de renommée internationale, 18 startups sélectionnées pour faire un pitch et 7 ateliers thématiques.

ALPHA-RLH a remis le prix de la startup la plus prometteuse et un chèque de 5 000 € à la société suisse Transmutex, pour son approche révolutionnaire de l'énergie durable.

L'évènement a été soutenu par la Région Nouvelle-Aquitaine, Bordeaux Métropole, la CCI Bordeaux Gironde, le centre d'innovation

pour les technologies quantiques Naquidis Center, ainsi que par le projet européen PhotonHub Europe.



BESOINS DE MAINTENANCE ET INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES DANS LA FILIÈRE AÉRONAUTIQUE

Organisée par ALPHA-RLH et Aerospace Valley, la 16^e journée PHAROS dédiée à la thématique « MCO/MRO dans la filière aéronautique : enjeux & innovations » s'est tenue le 28 novembre 2024 à l'Institut Evering à Mérignac et a rassemblé plus de 90 participants.

Daher, Dassault Aviation, Thales ainsi que la Direction de la Maintenance Aéronautique et l'Atelier Industriel de l'Aéronautique de Bordeaux (DMAé) ont exprimé les besoins en maintenance du secteur. Des innovations technologiques permettant le maintien en condition opérationnelle des flottes existantes et futures ont été ensuite présentées par HENSOLDT Nexeya France, NLOptics, l'ONERA, TECNALIA, Touch Sensity et 2MoRo.

11 étudiants de l'Université de Bordeaux et de l'ENSPIMA/Bordeaux INP ont partagé leurs travaux menés dans le cadre de projets tutorés autour de problématiques en lien avec la maintenance aéronautique, en collaboration avec des industriels.

Après une session de rendez-vous B2B, l'évènement s'est clôturé par la visite de l'Institut Evering : laboratoires, espace simulateurs, hangar avion.

PHAROS s'inscrit dans le cadre d'un partenariat entre ALPHA-RLH et Aerospace Valley qui a été renouvelé lors de cette journée avec la signature d'une nouvelle convention.



Ils ont rejoint le pôle

ALPHA-RLH a le plaisir d'accueillir 4 nouveaux adhérents dans le domaine photonique-laser :



AOI Tech : conçoit et fabrique des sources lumineuses innovantes pour la microscopie, la spectroscopie et l'éclairage tactique.



MAAGM : appareils de mesure qui utilisent l'optique pour explorer la planète.



NLOptics : propose une technologie qui permet une analyse détaillée et non destructive des composants électroniques.



RayXagon : dispositifs de vision nocturne.

Les technologies photoniques du pôle au Québec



Du 18 au 21 novembre 2024, le pôle ALPHA-RLH a participé à la 4^{ème} édition de l'évènement « Québec Mines+Énergie » avec le pôle AVENIA et quelques entreprises du domaine minier. Ce rendez-vous de réseautage et de partage de connaissances scientifiques s'est déroulé à Québec sur le thème « Le développement responsable de nos ressources : un gage de prospérité ».

Il a réuni plus de 2 300 personnes autour de conférences, d'un espace d'exposition et de formations spécialisées.

ALPHA-RLH y a participé avec l'objectif d'évaluer les besoins du secteur minier vis-à-vis des technologies photoniques du pôle. Il a en particulier présenté le projet européen FIQUgS qui réunit 10 partenaires dont la société Exail, le BRGM et l'Institut d'Optique Graduate School avec le Naquidis Center, centre d'innovation pour les technologies quantiques en Nouvelle-Aquitaine dont le pôle est partenaire.

Ce projet vise à développer un gravimètre quantique de pointe plus performant, plus robuste et plus précis qu'un capteur classique. Cet appareil est capable de mesurer les variations de la gravité en utilisant des principes de la physique quantique, pour des applications géophysiques (ex : cartographie du sous-sol).

Lors de cet évènement, le pôle ALPHA-RLH a pu explorer les débouchés sur le marché québécois et les opportunités de partenariats pour des projets d'innovation collaboratifs.

AGENDA

■ Salon Photonics West
28 au 30 janvier 2025
San Francisco

■ Lancement de la Maison du Quantique en Nouvelle-Aquitaine « HybQuant Naquidis »
31 janvier 2025
Talence

■ BIPSA : avancées et perspectives des nouvelles technologies en imagerie médicale
5 février 2025
Poitiers

■ Smart Buildings & Mobilities
13 février 2025
Limoges

Tous les évènements sur
www.alpha-rlh.com

Promotion accrue de la photonique en 2024 auprès des talents de demain

L'un des rôles majeurs de Photonics Bretagne est d'accompagner les centres académiques dans la promotion des formations initiales du territoire en photonique afin de permettre aux jeunes de découvrir un domaine d'avenir et de se former à des métiers passionnants. Cela passe également par la vulgarisation de la photonique auprès d'un public plus large tel que les parents ou les professeurs. Bilan de cette année 2024 : une série d'animations a été déployée permettant de sensibiliser près de 1000 personnes et notamment des jeunes – Fête de la Science, Semaine du Tourisme Economique et des savoir-faire, Semaine de l'industrie, stages de 3^{ème}, stages de 2^{nde}, Profs en Entreprise (CGénial), conférences métiers, divers cours et visites pédagogiques au sein de nos locaux. Celles-ci offrent l'opportunité de découvrir le laboratoire biophotonique et le développement d'instruments pour l'agriculture, le banc verrier et la tour de fibrage pour connaître le procédé de fabrication d'une fibre optique, et des ateliers pratiques pour s'initier à la soudure d'une fibre optique, mesurer le diamètre d'un cheveu par diffraction laser, ou encore voir comment détecter des micro-plastiques dans l'eau grâce à la photonique. Succès assuré !



AGENDA

■ SPIE Photonics West
25-30 janvier, San Francisco (États-Unis)

■ Blue Event Photonique & Mer
13 mars, Lannion

■ OFC
1-3 avril, San Francisco (Etat-Unis)

■ Laser World of Photonics
24-27 juin, Munich (Allemagne)

Recherche et innovation au cœur de la visite du ministre de l'Industrie à Lannion

© Eric Bothorel



Le nouveau ministre délégué chargé de l'Industrie, Marc Ferracci, est venu visiter Orange Innovation, Nokia et Lumibird en octobre à Lannion. L'occasion de faire le point sur les enjeux d'innovation et les projets en cours de développement : la 5G et son déploiement, la 6G, l'intelligence artificielle, le numérique, la fibre optique, la photonique ou encore la communication quantique. Face à cela, le ministre a notamment fait part de sa volonté de préserver le crédit impôt recherche en dépit des restrictions budgétaires. Au-delà des échanges avec les dirigeants des entreprises visitées, des élus et acteurs économiques du territoire de Lannion Trégor Communauté, il a également rencontré les élèves ingénieurs de l'ENSSAT et du BUT Réseaux et Télécommunication. Sa venue à Lannion s'est ponctuée par la remise d'une plaque « France 2030 » à Ekinops, qui a bénéficié de 4,9 millions d'euros de financement de l'Etat. Un soutien pour les technologies d'avenir.

Le projet QoQeliQo ambitionne de développer des lasers pour le quantique

Les solutions de lasers visibles pour le quantique actuellement sur le marché sont coûteuses et encombrantes. Le projet QoQeliQo, porté par Oxixus, en partenariat avec l'Institut Foton et Silentsys, vise à accompagner le développement industriel des technologies quantiques en proposant une offre de lasers visibles cohérents compacts et à prix compétitifs. La solution consiste à affiner par diffusion Brillouin stimulée (DBS) des lasers visibles utiles pour la manipulation d'atomes d'Yb (556 nm) et de Sr (689 nm). Oxixus a commencé à développer les premiers lasers de pompe à 532 nm et 556 nm ; les puissances et le contrôle en fréquence attendus pour le projet ont été démontrés en laboratoire. Il reste à poursuivre les tests et débiter l'intégration pour valider les premiers livrables du projet.

EXPLORATION SPATIALE : HEF PHOTONICS CONTRIBUE À LA MISSION LISA

Menée par la NASA et l'ESA, la mission LISA (Laser Interferometer Space Antenna) a pour objectif de développer et de mettre en œuvre un détecteur spatial capable de mesurer les ondes gravitationnelles dans une gamme de fréquences comprises entre 0,03 mHz et 0,1 Hz. LISA permettra de détecter ces ondes et de fournir des données cruciales pour comprendre certains des phénomènes les plus fascinants de l'univers. Dans ce cadre, HEF photonics (Kerdry) collabore avec OHB-Italia ; le groupe fournira les fenêtres optique GRS de la plateforme satellitaire, dans laquelle le détecteur d'ondes gravitationnelles sera intégré. Une mission de grande envergure !

Actualité



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

NANO-PHOT est devenue membre de Photonics France (www.photonics-france.org/) NANO-PHOT est associée au récent Institut Photonique et le premier 'Rendez-vous avec la Photonique' s'est tenu à Troyes le 27 novembre dernier avec la présence de nombreux étudiantes et étudiants de la Graduate School. Les thèmes abordés étaient 'Innovation, Imagerie optique, Mesure optique, Student Chapter' avec la présence d'Optica Europe.

Les doctorant.e.s et les étudiant.e.s master de NANO-PHOT vont présenter leurs travaux de recherche à la Journée des Doctorants de l'UMR 7076 L2n, laboratoire porteur de la Graduate School, le vendredi 13 décembre avec au programme des séquences courtes, des posters et des présentations format conférence. Des prix pour chaque catégorie sont à la clé.

AGENDA

■ 11th International Conference on Surface Plasmon Photonics
19 au 23 mai 2025, Tokyo, Japon
<https://spp11.tokyo/>

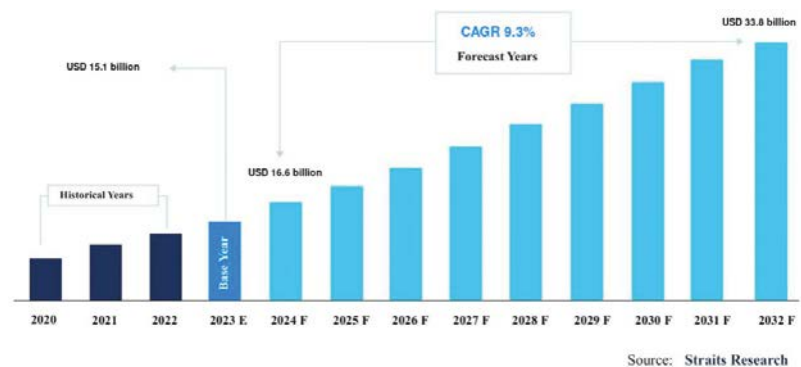
■ C'NANO, the Nanoscience Meeting
18 au 21 mars 2025
<https://cnano2025.sciencesconf.org/>

CONTACT

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

Participation de NANO-PHOT au forum des Entreprises de l'UTT

Le 1^{er} octobre 2024, l'École Universitaire de Recherche NANO-PHOT (EUR, nano-phot.utt.fr) a participé pour la première fois au forum des Entreprises de l'UTT. Des partenaires industriels de l'EUR ont pu rencontrer les étudiants qui ont eu un aperçu du marché de la nanophotonique en forte croissance.



Prévision de croissance du marché de la nanophotonique.

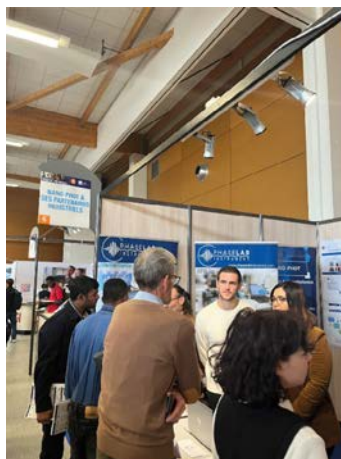
Les partenaires présents étaient

Nanovation, fondée en mars 2001. Elle est reconnue comme un leader mondial de la fabrication de couches minces à base d'oxydes, de nanostructures (oxydes et métaux) et de composants.

XRnanotech, principal fabricant suisse d'optiques à rayons X de la plus haute qualité, depuis les plaques de Fresnel à rapport d'aspect élevé et à résolution record jusqu'aux optiques en diamant ultra-stables et aux nanostructures 3D personnalisées pour une large gamme d'applications à rayons X.

Surys offre des solutions de sécurité visuelle difficiles à contrefaire et assurant l'authentification simple des documents d'identité, de voyage et des permis de conduire.

PhaseLab Instrument, Startup issue des travaux du laboratoire L2n de l'UTT proposant des systèmes rendant la technologie SPR (surface plasmon resonance) facile à utiliser, portable et accessible à tous les laboratoires. En particulier, un produit phare est un capteur plasmons compact à détection de phase.



Bienvenue à nos nouveaux adhérents



Aktantis (ancien Pôle SCS) : pôle de compétitivité deeptech en Région Sud et Occitanie.

IXcampus : réseau de campus en France pour des solutions technologiques et des projets industriels à impact.

LMS Conseils : décontamination des fruits et légumes par des flash de lumière de très haute intensité et riche en UV.

Percipio Robotics : solutions robotiques pour saisir et assembler les micro-composants avec une très grande précision.

Adhérer à Photonics France, c'est bénéficier de nombreux services pour développer votre réseau professionnel et vos activités. C'est contribuer également à une représentation solide de toute la filière photonique auprès des pouvoirs publics. Rejoignez-nous !

AGENDA

Nos prochains rendez-vous :

■ **Webinaire : présentation des nouveaux adhérents**
14 janvier 2025 - en ligne

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

■ **Business Meeting : La Photonique avec Horiba**
20 mars 2025 - Palaiseau

■ **Assemblée générale de Photonics France**
9 avril 2025 - Paris

CONTACTER
PHOTONICS FRANCE

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

French Photonics Days à Besançon Retour sur l'évènement

Besançon a accueilli les 15 et 16 octobre 2024, la sixième édition des French Photonics Days. Ces deux journées ont rencontré un très grand succès, avec plus de 180 participants issus de 120 entreprises et institutions différentes.

Le programme de l'édition 2024 a mis en valeur le savoir-faire des acteurs régionaux et transfrontaliers avec pour thématique principale les « Micro-nanotechnologies photoniques de rupture », illustrée par les conférences d'entreprises locales.

D'autres sessions étaient dédiées à la sensibilisation et la formation aux métiers de la photonique ainsi qu'aux enjeux européens. Pierre Chastanet, chef d'unité de l'industrie microélectronique et photonique à la Commission européenne, a fait un état des lieux de la stratégie européenne en photonique.

Tous les orateurs ont contribué à la réussite de l'évènement avec des présentations de qualité et une approche pédagogique dans l'esprit de cet évènement.

Photonics France, SupOptique Alumni et FEMTO-ST remercient chaleureusement tous les participants pour leurs échanges constructifs et fructueux qui furent propices à l'innovation et aux collaborations futures.



Orientation Photonique

Un écosystème au service de l'emploi et la formation

Pour rendre la photonique et ses opportunités plus visible, Photonics France développe l'activité du site Orientation Photonique.



L'écosystème Orientation Photonique se développe au-delà du site web initial. Il rassemble les offres d'emploi et de formation des adhérents de Photonics France. Il partage également toutes les initiatives dédiées à la formation et à l'emploi en photonique.

Retrouvez-nous sur LinkedIn, sur Youtube et sur Instagram pour val-

oriser vos formations, vos offres d'emploi, vos actions de communication sur la photonique : @orientation_photonique

Envoyez-nous vos actualités et vos offres de formations et pensez à nous taguer. Nous les publierons sur le site Orientation Photonique et vous relaierons sur nos réseaux sociaux.

L'Institut d'Optique, iXcampus et l'Institut quantique de l'Université de Sherbrooke partenaires pour la création des Chaires Alain Aspect

L'Institut d'Optique, l'Université de Sherbrooke et iXcampus annoncent le lancement de deux chaires Alain Aspect. Ce projet de chaires témoigne de la volonté de rapprocher deux écosystèmes académiques et industriels complémentaires partageant une même culture d'innovation francophone.

Côté français, l'Institut d'Optique et iXcampus portent la chaire Alain Aspect « Sciences et technologiques de la lumière et du quantique » qui visera à mener des recherches de pointe et développer une offre de formation où la question de l'impact sociétal et environnemental des technologies photoniques et quantiques occupera une place centrale. Côté québécois, l'Université de Sherbrooke porte la chaire Alain Aspect « Système de traitement de l'information quantique » qui visera à mener des recherches en s'appuyant sur la présence d'entreprises engagées dans la mise au point de différents types d'ordinateurs quantiques.

« Grâce à ces deux écosystèmes, à leurs infrastructures et leurs talents exceptionnels, nous allons pouvoir apporter aux chercheurs et aux industriels les outils pour répondre aux défis scientifiques et aux enjeux auxquels nous faisons face. »

Alain Aspect, prix Nobel de physique 2022.



En bref

500

C'est le nombre de participantes et participants au Gala SupOptique, spécial centenaire de l'Association SupOptique Alumni. Le 15 novembre 2024, au Chalet du Lac à Paris, les élèves, les alumni et les personnels de l'Institut d'Optique se sont rassemblés pour un moment festif. A l'occasion de son centenaire, SupOptique Alumni avait préparé une cérémonie brillamment animée par Célia Pelluet et Baptiste Cerisier (alias Ceryse), tous deux de la promo 2020 : sketches, diaporama, chansons revisités et reprises par le public ont rythmé la soirée pour le plus grand plaisir de tous.

AGENDA FORMATION CONTINUE

■ Fabrication et contrôle de systèmes optiques
04-06 mars 2025

■ Bases de l'optique
11-28 mars 2025

■ Mesure de front d'onde
20-21 mars 2025

■ Infrarouge thermique : choix et utilisation d'une caméra
01-04 avril 2025

■ Systèmes optiques d'imagerie
07-11 avril 2025

■ Acquisition d'images avec une caméra
08-10 avril 2025

■ Approche contemporaine des fondamentaux du traitement d'image et de la vision par ordinateur
28-30 avril 2025

Retour sur le 38^e Forum de la Photonique

Daniel Madrac



La 38^e édition du Forum de la Photonique s'est tenue le 14 novembre 2024 au bâtiment 503, centre d'entrepreneuriat et d'innovation de l'Institut d'Optique, tout juste inauguré.

Organisé par une équipe d'étudiantes et étudiants très motivées, cet événement a rassemblé une cinquantaine d'acteurs du monde de la photonique et des technologies quantiques venus présenter leurs activités et leurs opportunités de stages, d'emplois et de thèses.

Plus de 300 étudiantes et étudiants de l'Institut d'Optique, mais aussi issus d'autres formations en optique-photonique (IUT, BTS, ...), se sont succédés au cours de la journée pour découvrir le monde professionnel et profiter de rencontres inspirantes afin de construire leur propre projet.

Les participantes et participants ont assisté à une conférence sur la fusion inertielle menée par le LULI et Thales. Les élèves du Forum de la Photonique ont également animé une table ronde passionnante sur l'essor des technologies quantiques en présence de représentants des sociétés Exail, Pasqal, Quandela, Viqthor et Welinq.

Cette édition a remporté un franc succès autant auprès des élèves qu'auprès des exposants, ravis de découvrir à cette occasion les nouveaux espaces du bâtiment 503.

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



Hommage à Jean Bulabois (1937-2024)

fondateur de la SFO et promoteur de la recherche partenariale

Pierre CHAVEL, John DUDLEY, Jean-Claude FONTANELLA,
Maxime JACQUOT, Ghislain MONTAVON

Voici tout juste un an, Jean-Bulabois répondait à l'invitation de la SFO de célébrer le quarantième anniversaire de notre société, dont il avait été le premier président. Quelques mois auparavant, il assistait aux manifestations pour les 600 ans de l'Université de Franche-Comté, et des 60 ans du laboratoire d'Optique, devenu le département Optique de l'Institut FEMTO-ST à Besançon. Il allait également célébrer les 25 ans de l'Université de technologie de Belfort-Montbéliard, dont il avait été le premier président. Ces trois institutions caractérisent la carrière de ce collègue estimé, qui vient de nous quitter brutalement le 9 septembre dernier. On va le voir, le fil conducteur de son activité professionnelle a été le lien entre l'université et le secteur privé. Formé à la faculté des sciences de Besançon, il avait été recruté au cours de ses études de physique comme technicien avant de rejoindre les rangs des enseignants-chercheurs et de préparer, sous la direction de Jean-Charles Viénot, sa thèse de troisième cycle, soutenue en 1963, avec pour sujet la cohérence du laser [1] ; en cette période de pionniers, il avait lui-même appris à construire ses lasers en profitant de conseils de collègues de l'École Polytechnique ! Sa thèse d'État prit la suite en 1968 [1], sur les applications de l'optique de Fourier, dont les bases étaient dues à Pierre-Michel Duffieux, professeur à Besançon. De cette période, on retiendra également la forte implication de Jean à l'organisation, à Besançon, d'un congrès international d'holographie qui a marqué un temps fort pour les experts du monde entier. Jean enseignera ensuite la physique à la faculté des sciences et poursuivra longtemps ses recherches au sein de ce qui est aujourd'hui le département Optique de l'Institut FEMTO-ST, tout en profitant de périodes sabbatiques pour se ressourcer par des séjours aux États-Unis et au Canada. Très rapidement, Jean s'implique dans l'animation de la communauté scientifique. Une évidence le frappe : l'optique connaît un bouleversement avec l'invention du laser, suivie de celle des fibres optiques à très faibles pertes et de technologies comme l'optique guidée. Une révolution s'amorce, qui ne peut pas concerner seulement le monde universitaire mais impacte d'emblée les enjeux de société et l'économie. Pour en profiter pleinement, l'optique française a besoin d'une initiative : une société savante qui rassemble non seulement les laboratoires publics des universités et autres institutions de recherche, mais aussi les centres de recherche industriels, et qui débouche sur l'innovation. C'est dans ce but qu'avec quelques collègues, Jean crée en 1983 la Société

Française d'Optique en englobant la structure précédente, dont les membres étaient cooptés, le « Comité français d'optique », présidé en dernier lieu par Jacques Badoz. De nos jours encore, la présidence de la SFO alterne entre les universités très souvent associées au CNRS, les autres organismes publics et les laboratoires industriels ou jeunes entreprises innovantes. La dimension internationale s'y ajoute aussi dès le début, en Europe avec la création de l'European Optical Society, et dans le monde entier par des alliances avec SPIE, puis OSA/OPTICA pour l'organisation des principaux congrès. Photoniques s'est amplement fait l'écho de l'histoire de la SFO en 2023 [2].

Élu en 1986 à la fonction de doyen de la faculté des sciences et techniques, Jean est simultanément chargé de « l'action optique » au ministère de la Recherche et de la Technologie, département mathématiques technologies de l'information. En 1985, un rapport sur l'optique rédigé à la demande de ce ministère sous la coordination de Jean Jerphagnon avait insisté sur la nécessité d'associer les secteurs public et privé pour faire profiter l'économie française du potentiel renouvelé de l'optique : Jean est évidemment la personne tout indiquée pour prendre en charge cette mission, qu'il poursuivra pendant sept ans. Un nouveau rapport, sous l'égide du Comité des Applications De l'Académie des Sciences (CADAS), relève la transition « de l'optique à la photonique » et propose une structuration des recherches. Des budgets sont fléchés par le ministère. Ils permettront chaque année des appels d'offres soigneusement préparés par Jean avec les comités et les réseaux

Photo prise début 2024 à l'occasion du 25^e anniversaire de l'Université de technologie de Belfort Montbéliard, avec tous les directeurs de cette institution. De gauche à droite : Pascal Fournier, Christian Coddet, Jean Bulabois, Ghislain Montavon.





Photo de Jean Bulabois prise septembre 2023 à EOSAM Dijon durant un entretien filmé à l'occasion des 40 ans de la SFO [3].

d'experts qu'il met en place. Un document sur « *l'exploitation du rapport du CADAS* », commandé par Jean et dont la rédaction a été coordonnée par l'un de nous (JCF) conclura en 1993 cette phase d'effervescente mise en réseau du riche tissu français de l'optique. Nouvelle orientation de carrière en 1995 : appelé à une action structurante dans l'enseignement supérieur du Nord de la Franche-Comté, Jean accède à la direction de l'Institut polytechnique de Sevenans, fondé comme une marcotte de l'Université de technologie de Compiègne, qui se transforme sous sa houlette pour donner naissance en 1999, par fusion avec l'École nationale d'ingénieurs de Belfort, à l'Université de technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM). Il a ainsi été le premier directeur de l'UTBM, et a su donner vie à une nouvelle vision de l'ingénieur, à la fois ancrée dans la technique et ouverte aux questions humaines et sociales. Il voyait l'éducation non pas comme un simple transfert de connaissances, mais comme une formation globale, préparant de jeunes hommes et femmes à être capables de comprendre et d'agir dans un monde complexe.

C'est à lui encore qu'est confié dans ce cadre le Centre national de recherche technologique « pile à combustible et transport terrestre », qui regroupe une liste impressionnante de partenaires publics et privés pour mettre en place les premières initiatives. Dans les différentes fonctions qu'il a occupées, Jean a laissé le souvenir d'un homme d'une grande humanité, très compétent mais aussi très dynamique et volontariste. Ceux qui ont eu la chance de travailler à ses côtés évoquent unanimement ses qualités d'empathie, d'écoute et d'altérité. Il avait cette capacité rare de faire sentir à chacun qu'il était entendu, compris et respecté. Jean prend en 2002 une retraite bien méritée tout en gardant le contact avec ses collègues dans les diverses institutions où il a exercé son activité, tout particulièrement l'Université de Franche-Comté. ●

RÉFÉRENCES

[1] <https://catalogue.bnf.fr/ark:/12148/cb32935889t>

[2] P. Chavel, B. Boulanger, "La SFO a quarante ans," *Photoniques* 118, 22-24 (2023)

[3] <https://youtu.be/EPwwUkhFH2o>

Optical models for material appearance

By
Mathieu Hébert



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

Also available in e-book format

For sale on
laboutique.edpsciences.fr

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





Entretien avec Philippe Lalanne

directeur de recherche CNRS au LP2N à Bordeaux,
lauréat du grand prix de la SFO 2024 Léon Brillouin.

COMMENT EST NÉ VOTRE INTÉRÊT POUR LES SCIENCES ?

J'ai toujours aimé la logique sans faille des mathématiques. Mon intérêt pour la physique est né lors d'un cours de mathématiques en terminale au Lycée Montaigne de Bordeaux sur les coniques, illustré avec les lois de Kepler. J'ai été fasciné d'apprendre que des lois aussi simples puissent régir les trajectoires des planètes.

COMMENT DÉCOUVREZ-VOUS L'OPTIQUE ?

Tardivement, l'optique en prépa ou L3 à Jussieu ne m'avait pas passionné. J'ai fait ensuite un DEA en physique des solides à Orsay. La discipline me plaisait beaucoup. Alors que je pensais poursuivre avec une thèse à Toulouse, pour des raisons personnelles, très tardivement, j'ai cherché une thèse en région parisienne (j'étais très libre de choisir car ma première année de thèse se faisait pendant la 4^{ème} année d'ENS). J'avais rencontré Pierre Chavel l'année précédente lors de ses cours de préparation à l'agrégation. Je le trouvais rigoureux.

QUELLE ÉTAIT LA PROBLÉMATIQUE DE VOTRE THÈSE ?

Dans les années 80, les premiers ordinateurs grand public naissaient. Ils n'étaient guère puissants et se posait la question de réaliser des ordinateurs optiques plus puissants (certains se souviendront du Club Optique pour l'Ordinateur abrité par la SFO). Mes travaux de thèse s'inscrivaient dans cette problématique. Ils portaient sur la mise en œuvre de machines neuronales opto-électroniques. *A priori* un bon sujet, car les circuits intégrés planaires n'étaient pas adaptés à la réalisation d'interconnexions massives. Le domaine était déjà en effervescence

à l'époque ; je me rappelle un congrès à Paris en 1988 avec plus de 1000 participants venant de la biologie, l'électronique, la physique statistique, le traitement des images... et l'optique.

QUELLE A ÉTÉ VOTRE CONTRIBUTION ?

Ma première réalisation mettait en œuvre un modèle de mémoire associative, dit de Hopfield (un des deux lauréats du prix Nobel de physique 2024). Rapidement, nous réalisons que ce modèle repose essentiellement sur une corrélation entre l'image à classer et les images « mémorisées ». Les opticiens connaissent bien la corrélation, et ses limitations pour la reconnaissance de forme. Y avait-il vraiment du nouveau dans le modèle ? En seconde année de thèse, je suis scientifique du contingent avec une solde de soldat, et je travaille dans le groupe de Francis Devos à l'Institut d'Electronique Fondamentale (IEF) à Orsay sur la Machine de Boltzmann inventée peu de temps auparavant par Hinton, le second lauréat du Nobel 2024. Par rapport au modèle de Hopfield, cette machine fait intervenir des couches cachées (« deep learning » aujourd'hui) et contient plus de physique avec ses neurones stochastiques. Ma troisième année de thèse est financée par une bourse qui me conduit à effectuer un service de Maître de Conférence à l'Université d'Orsay ; elle sera consacrée à la réalisation d'un système qui génère massivement des nombres aléatoires, grâce au speckle optique, pour alimenter les neurones stochastiques des circuits de l'IEF.

SUR QUEL SUJET DE RECHERCHE CONSACREZ-VOUS VOS PREMIÈRES ANNÉES DE RECHERCHE AU CNRS ?

J'ai été recruté au CNRS en septembre 1989 et j'ai soutenu ma thèse un

mois après.

J'ai orienté mes travaux sur les machines de Boltzmann vers des modèles stochastiques pour le traitement d'image (chaines de Markov). Avec nos collègues de l'IEF et Jean-Claude Rodier qui travaillait alors dans le « labo d'électronique » de notre Institut, ma principale réalisation a été une machine optoélectronique composée d'un circuit CMOS analogique de 32x32 processeurs élémentaires identiques (les neurones stochastiques). Chaque processeur comportait des « photodiodes » qui permettaient de convertir le bruit de speckle en courants aléatoires. Éclairé par une image optique bruitée, le circuit était alors capable de la restaurer par recuit simulé (problème similaire au modèle d'Ising) à cadence vidéo. J'en fais la démonstration lors de mon Habilitation à Diriger les Recherches, peu après mon année sabbatique aux États-Unis.

QU'EST-CE QUI VOUS MOTIVE À ORGANISER CE SÉJOUR D'UN AN AUX USA ?

Au début des années 90, les progrès des ordinateurs électroniques étaient fulgurants, et pour rester compétitives, les architectures sur lesquelles nous travaillions intégraient de plus en plus d'électronique. L'optique semblait cantonnée à des niches. Sur les conseils de Pierre, qui pressentait l'émergence de l'optique diffractive, je suis parti en 1995 pour un an dans le groupe de Mike Morris à l'Université de Rochester afin de me former dans ce domaine.

SUR QUELS SUJETS TRAVAILLEZ-VOUS À ROCHESTER ?

À l'époque, l'optique commençait à explorer le potentiel des nanotechnologies pour concevoir des composants avec des motifs plus petits que la longueur d'onde qui se comportaient

comme des matériaux artificiels (homogénéisation). À Rochester, j'ai fabriqué ces matériaux pour le traitement antireflet des cellules solaires, avec des gradients d'indice perpendiculaires aux substrats. Parallèlement, j'ai commencé à me familiariser avec l'optique électromagnétique, notamment les travaux de l'école marseillaise sur la diffraction par les réseaux. En travaillant sur l'homogénéisation, j'ai la chance de comprendre comment améliorer la convergence de la méthode RCWA (c'est la méthode la plus utilisée encore aujourd'hui pour analyser la diffraction par des réseaux). Ce séjour, bien que limité à un an, a été intense et productif ; j'ai beaucoup travaillé, très souvent « seul », aidé par mon épouse parfois, et j'ai beaucoup appris. Le séjour a marqué un virage dans ma carrière. À partir de là, ma recherche s'est orientée vers l'élaboration de modèles théoriques basés sur les modes pour comprendre et modéliser les nanostructures optiques.

COMMENT PARVEZ-VOUS À LANCER UNE DYNAMIQUE AUTOUR DE CES THÈMES À VOTRE RETOUR AU LABORATOIRE ?

À mon retour, j'ai la chance de commencer à collaborer avec Jean-Paul Hugonin, un enseignant chercheur de mon groupe qui avait une formation initiale en mathématiques et une thèse sous la direction de Roger Petit à Marseille. Je ne savais pas encore que cette collaboration allait s'intensifier pendant près de 20 ans pour durer encore aujourd'hui malgré l'éloignement géographique. Après des premiers travaux sur l'homogénéisation, j'ai commencé à étudier les optiques diffractives utilisant des gradients d'indice parallèles aux substrats (appelées aujourd'hui métasurfaces) avec mes codes RCWA à l'état de l'art. Avec la bienveillance de Pierre, est organisée une réunion au L2M à Bagneux avec Edmond Cambril et Huguette Launois afin de fabriquer ces composants. Je défends le projet maladroitement car hormis que le sujet est tentant, je n'ai pas d'arguments scientifiques forts. À la fin de la réunion,

alors que j'entrevois une issue négative, Huguette Launois rend son verdict : « Bon Edmond, on va le faire ».

Ce qu'Edmond réalise alors, très peu de laboratoires dans le monde en sont capables. Et quelques mois après, je caractérise des composants remarquables composés de nano-piliers gravés dans une couche de TiO_2 qui diffractent 90% de la lumière transmise dans le bon ordre, même quand la lumière est déviée avec de grands angles. L'amélioration de la méthode RCWA à Rochester et ce résultat inattendu ont été très bien accueillis par l'ensemble de la communauté et m'ouvrent des portes, notamment auprès des industriels de la photonique. Le retour des industriels n'est pourtant pas à la hauteur de mes espoirs : les composants fabriqués par Edmond étaient des prouesses de laboratoire très onéreuses qui reposaient sur des nanogravures profondes. J'ai pris cette critique très à cœur, d'autant plus que Mike Morris n'avait pas voulu que je travaille avec lui sur ces composants, exactement pour cette raison. J'apprenais combien il est important que la recherche appliquée cible des sujets avec un réel potentiel commercial. Ce n'était pas si clair qu'aujourd'hui à l'époque en France. Avec un pincement, j'ai stoppé mes travaux dans le visible.

POUR AUTANT, VOUS AVEZ LARGEMENT COLLABORÉ AVEC LES INDUSTRIELS DANS VOTRE CARRIÈRE.

Dès mon retour de Rochester, j'ai mené des études ponctuelles pour Photonetics, Corning Avon et le CEA « Mégajoule ». J'ai eu la chance que deux grands groupes français s'intéressent à mes travaux en optique diffractive. Grâce à Jean-Pierre Huignard, qui présentait les opportunités offertes par les « métasurfaces » pour l'imagerie thermique, j'ai d'abord collaboré pendant dix ans avec Thalès sur des problématiques de traitements antireflets et de métalentilles à large bande. Par la suite, j'ai travaillé plus de 10 ans avec Saint-Gobain sur les optiques diffractives pour le vitrage. Aujourd'hui, je

poursuis cette dynamique en collaborant avec STMicroelectronics.

PLUSIEURS DE VOS TRAVAUX ONT ÉTÉ VALORISÉS PAR DES LOGICIELS.

C'est un sujet sensible pour nous. D'abord, nous avons mis longtemps à comprendre que cette valorisation est importante. Fin des années 90, la communauté Française considérait un logiciel comme un bien précieux à garder jalousement.

Nous avons donc commencé par vendre des licences de notre logiciel RCWA (Reticolo) à des industriels. Ce n'est que tardivement, en 2012 que nous l'avons rendu public quand un logiciel concurrent a été mis en accès libre par des chercheurs qui n'avaient en rien contribué au développement de la méthode. Notre logiciel n'a jamais fait l'objet d'une publication dans une revue. Quel amateurisme. Cela ne l'a pas empêché d'être largement diffusé et utilisé en particulier par de grands groupes français et étrangers. Par deux fois, certains autres outils que nous avons développés ont été incorporés dans de grands logiciels d'électromagnétisme (COMSOL cette année) avec des remerciements aussi légers que fugaces (sourire).

COMMENT ÉVOLUEZ-VOUS DES MÉTASURFACES À LA PLASMONIQUE ET AUX CRISTAUX PHOTONIQUES ?

En 1999, lors d'un workshop extraordinaire sur l'optique guidée organisé par Olivier Parriaux dans un château retiré non loin de Saint-Etienne, j'ai la chance de réaliser que les modes de Bloch des métasurfaces n'étaient pas bien loin d'être les modes guidés de nano-piliers. À partir de là, l'étude des cristaux photoniques en optique guidée s'ouvre à nous et les choses s'enchaînent très rapidement. En 2000, Jean-Paul et moi introduisons des modifications minimales dans nos codes RCWA pour implémenter des couches absorbantes, et disposons ainsi d'une méthode modale pour analyser des structures non périodiques, en particulier les ●●●

structures guidantes. Puis nous trouvons une méthode numérique stable pour analyser la propagation et la diffusion des modes de Bloch des guides périodiques, ce qui nous donne un point d'entrée complètement original dans les cristaux photoniques. Et encore un peu après, à partir de 2010 avec Christophe Sauvan, nous développons des méthodes modales pour analyser les résonateurs électromagnétiques dans la base de leur résonance propre.

COMMENT VOUS-ÊTES-VOUS IMPLIQUÉ DANS LA PLASMONIQUE, EN PARTICULIER DANS LA TRANSMISSION EXTRAORDINAIRE ?

Je me lance dans la plasmonique par accident grâce à un ami Roumain qui me signale un article de la revue Nature en 1998 et m'invite à étudier le sujet : « Philippe, avec tes codes RCWA ... ». Dans cet article, Thomas Ebbesen, Henri Lézec et leurs collègues alors à Princeton mesurent la lumière qui passe à travers un réseau de tout petits trous dans un film métallique et soulèvent un problème crucial, celui du confinement de la lumière dans de petits volumes. Rapidement une polémique naît sur l'interprétation qui attribuait un rôle singulier aux plasmons. Le travail théorique que nous menons durant toutes les années 2000 avait un objectif simple : comprendre le rôle des plasmons. Avec les codes RCWA, nous reproduisons le phénomène de transmission, mais pour autant, nous n'arrivons pas à comprendre. Même constat avec nos premiers modèles approchés. Nous avons alors développé un modèle microscopique de la transmission extraordinaire qui prend en compte les plasmons explicitement. Ce modèle révèle que les plasmons ne jouent qu'un rôle partiel dans le domaine du visible et sont quasiment absents dans l'infrarouge et au-delà.

QUEL REGARD PORTEZ-VOUS AUJOURD'HUI SUR CETTE PÉRIODE DE VOTRE PARCOURS ?

Sincèrement, cela a été la plus période la plus exaltante professionnellement,

avec de nombreuses collaborations enrichissantes sur les cristaux photoniques (tapers, lumière lente, cavités). Les travaux de compréhension sur le confinement dans les cavités photoniques et la transmission extraordinaire m'ont passionné, car malgré de nombreux détours, ils étaient motivés par une question « simple ». Ils étaient aussi très compétitifs ; les travaux du domaine étaient souvent critiqués avec vigueur et il fallait se battre pour faire valoir son point de vue.

Et puis j'ai eu la chance de travailler quotidiennement pendant 10 ans avec Jean-Paul. Nos journées commençaient ensemble par un café et de longues discussions qui bien souvent commençaient avant le lever du jour dans un labo presque désert. Nous nous autonomisrions d'intuitions bien différentes mais complémentaires, mais partagions un même objectif : comprendre et expliquer simplement avec des codes précis.

VOTRE INSTALLATION À L'IOGS À BORDEAUX SEMBLE MARQUER UN TOURNANT.

En effet, en 2010 se crée une antenne de l'Institut d'Optique à Bordeaux. Je suis l'un des quatre seniors qui participent alors à la mise en place du LP2N sous la houlette de Philippe Bouyer.

J'ai la chance d'arriver à Bordeaux lors des grandes réunions préparatoires à la création des LABEX. Cela m'a permis de rapidement percevoir les activités du site, et notamment l'ampleur de la recherche menée sur les nanomatériaux synthétisés par voie chimique. J'ai alors cessé mes collaborations sur les cristaux photoniques en optique intégrée pour réorienter mes travaux sur des collaborations locales.

L'installation n'a pas été simple mais elle fut très stimulante : un esprit d'aventure a certainement soufflé alors, principalement parce que nous arrivions alors sans collaborateurs, dans un labo sans mur. Nous avons dû nous serrer les coudes et sortir de notre zone de confort pour définir des projets communs. C'est ainsi qu'est née l'idée de contrôler l'apparence avec des

métasurfaces désordonnées en associant des compétences en infographie (Xavier Granier) et en nanophotonique des métasurfaces. C'est cet esprit de décloisonnement que je retrouve depuis 2019 lors de mes séjours annuels dans le groupe de Mark Brongersma à Stanford.

VOS RECHERCHES ACTUELLES SONT PLEINEMENT Tournées VERS LES EFFETS VISUELS DES MÉTASURFACES. COMMENT S'EST MIS EN PLACE LE PROJET ?

Le projet a bénéficié du soutien constant de Philippe Bouyer, qui a notamment contribué à obtenir des financements CPER pour sa partie expérimentale. Il a été impulsé par Kevin Vynck dès son arrivée au LP2N en 2014. Aujourd'hui, notre objectif est d'explorer les effets visuels innovants que l'on peut générer avec les métasurfaces.

Le projet englobe plusieurs volets nécessitant des compétences variées : milieux désordonnés, nanomatériaux, nanophotonique, modélisation multi-échelle et rendu visuel. Nous avons récemment recruté un doctorant titulaire d'un master en infographie.

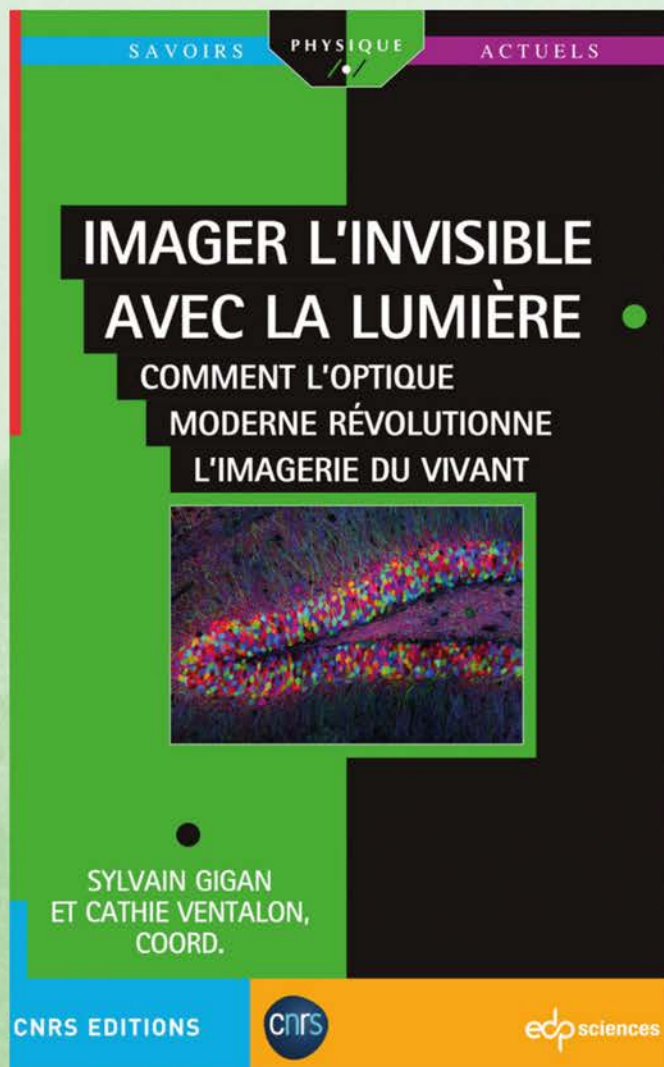
De nombreuses questions émergent à l'intersection des nanotechnologies et d'attributs tels que couleur, brillance ou encore transparence. À terme, j'aimerais que nous puissions également explorer des effets visuels originaux dotés d'une forte dimension artistique.

QU'APPRÉCIEZ-VOUS LE PLUS DANS LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ?

J'apprécie la grande liberté qui nous est donnée, notamment celle de choisir notre thématique, avec des approches tantôt théoriques tantôt expérimentales. C'est aussi une chance d'avoir un métier qui consiste à comprendre, surtout quand ce sont des choses inconnues, et de partager ces connaissances nouvelles avec des gens passionnés, au quotidien avec les collègues proches, étudiants, postdocs et visiteurs. J'espère qu'ils se reconnaîtront et je les remercie. ●

Comment l'optique moderne révolutionne l'imagerie du vivant

VIENT DE
paraître



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



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

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

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

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

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

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





TÉMOIGNAGE D'ENTREPRENEUR

Jean-François Vinchant, SEDI-ATI

Entretien avec Jean-François Vinchant, PDG de SEDI-ATI, entreprise spécialisée dans l'assemblage de fibres optiques pour environnements extrêmes.

POUVEZ-VOUS NOUS DÉCRIRE VOTRE PARCOURS ?

J'ai suivi un parcours d'ingénieur à l'ISEN - Institut Supérieur d'Électronique du Nord à Lille avec une formation axée sur la microélectronique et les semi-conducteurs. J'ai ensuite fait un DEA en acoustique et en optique à l'université de Valenciennes. J'ai poursuivi par une thèse sur l'intégration monolithique de photodétecteurs avec des guides optiques. J'ai fait ma thèse dans l'équipe optoélectronique du CHS qui est devenu l'IEMN chez Didier de Coster et Jean-Pierre Vilcot.

QUELS ÉTAIENT LES OBJECTIFS VISÉS PAR CES TRAVAUX DE THÈSE ?

Nous cherchions à démontrer la faisabilité d'atteindre des très hauts débits. Nous avons montré des capacités de détection dans le domaine du GHz, notamment à base de détecteurs MSM (métal-semiconducteur-métal).

QUELLE A ÉTÉ VOTRE PARCOURS APRÈS VOTRE THÈSE ?

J'ai eu la chance d'avoir comme rapporteur Marko Erman qui m'a embauché par la suite dans son équipe chez Philips en optoélectronique. J'ai commencé en postdoc au LEP (Laboratoire d'Électronique Philips) et j'ai très vite été embauché. Nous travaillions sur des switchs optiques, soit individuels, soit sous forme de matrice. Je me souviens d'avoir travaillé sur les premiers projets européens dédiés au switch optique. Et un an après, l'équipe était rachetée par Alcatel et c'est ainsi que je me suis retrouvé à Marcoussis avec des équipes qui travaillaient sur les lasers alors que

nous travaillions plutôt sur les commutateurs optiques. J'ai passé 3 ans dans la division recherche à Marcoussis et en 94, j'ai intégré la toute nouvelle filiale d'Alcatel, qui s'appelait Alcatel Optronics.

POURQUOI AVEZ-VOUS QUITTÉ VOTRE POSTE ?

En 2007, je cherchais à aller plutôt dans une plus petite structure. J'ai pu bénéficier de ce qui s'appelait à l'époque d'un plan de licenciement assez intéressant au niveau d'Alcatel. J'ai pu grâce à cela financer en 2007-2008 une formation intitulée Management Général à l'Essec. A la suite de cette formation, je me suis retrouvé à la tête d'une PME sur Besançon en 2009, où j'étais directeur général d'une société qui s'appelle PolyCaptil. L'actionnaire de cette entreprise a racheté une entreprise spécialisée dans la conception de cartes électroniques ce qui m'a amené à diriger ces 2 entreprises. Cette formation a été déterminante car elle m'a permis par la suite de naviguer dans un bilan et un compte de résultats sans problème et de savoir si une boîte marche bien ou pas.

COMMENT AVEZ-VOUS CONNU SEDI-ATI ?

Lorsque l'on souhaite reprendre une entreprise, il n'est pas toujours pertinent de chercher des entreprises qui sont à vendre parce qu'il s'agit souvent de sociétés qui ne se portent pas très bien. C'est pourquoi nous nous sommes concentrés avec le cabinet qui m'accompagnait sur ce que l'on appelle le marché caché. Je me rappelle que l'été 2015, le cabinet m'avait fourni 2 fichiers de 250 entreprises correspondant aux critères que nous avions

fixés en termes de taille, de chiffre d'affaires, ou de localisation. J'ai regardé toutes ces entreprises et j'ai retourné au cabinet une liste d'une trentaine d'entreprises ciblées en septembre. La consultante du cabinet a contacté par téléphone chacune des 30 entreprises. À notre grande surprise, nous avons reçu 7 réponses positives de personnes souhaitant discuter. C'est ainsi que j'ai découvert SEDI-ATI. J'ai vu le potentiel de cette entreprise. De plus, les activités développées par cette entreprise me permettaient de me rapprocher de la photonique. Signalons que ces démarches de reprise se déroulaient en parallèle de mes activités à Besançon.

QUELLE ÉTAIT L'HISTOIRE DE CETTE ENTREPRISE AVANT SON RACHAT ?

Le fondateur avait créé en 1951 ATI, qui était une société faisant de la connectique électrique. La partie production était dédiée au départ à l'électrique et puis avec l'arrivée de la fibre optique, ils se sont mis à produire aussi de la connectique de fibres. En 1972, les fils de ce fondateur, Patrice et François Louis, ont fondé la société SEDI qui était plutôt une boîte de distribution. Et avec l'arrivée de la fibre optique, ATI s'occupait des fibres optiques et SEDI de leur distribution. En 2008, la partie électrique a été vendue à une société américaine qui s'appelait Conesys, cette dernière société a depuis été reprise par Esaris. Cette société est localisée près d'Evry. ATI et SEDI ont fusionné en 2012 et c'est cette société là que j'ai reprise en 2016. Nous ne faisons quasiment plus de distribution et nous concentrons nos efforts sur la production et le développement.

EN QUELLE ANNÉE LA VENTE EST-ELLE FINALISÉE ?

En juillet 2016, j'ai pris la majorité de la société et j'ai emmené avec moi Île-de-France Capital, le fonds régional de la région Île-de-France, qui a pris 25% de participation dans la société. J'ai reçu également le soutien de BPI qui m'a beaucoup aidé. En juillet 2023, j'ai fait rentrer un gros fond d'investissement qui s'appelle Yotta Capital Partners qui a pris la majorité. Je ne possède aujourd'hui plus que 27% du capital, mais je suis toujours le président directeur général.

POURQUOI AVEZ-VOUS CHOISI DE CÉDER VOTRE MAJORITÉ DU CAPITAL À CE FONDS D'INVESTISSEMENT ?

Il y a plusieurs raisons. La première, c'est que SEDI-ATI étant spécialisée dans les assemblages de fibres optiques pour les environnements extrêmes, nous interagissons directement avec de très grands groupes, comme Ariane Group, Thales, Nexter, MBDA. Face à ces groupes, SEDI-ATI avec un CA de 8M€ et 60 salariés, apparaît comme une petite société. Ce fonds d'investissement nous permet de garantir une bonne assise financière, et surtout de mettre en place un programme de croissance externe,

c'est-à-dire non seulement garantir une croissance interne et organique de la structure, mais aussi pouvoir racheter d'autres entreprises. Le seconde raison est qu'à 62 ans, je me dois de préparer ma retraite qui n'est plus si lointaine, et c'est pour moi une manière de préparer la transition en positionnant d'autres personnes qui prendront le relais.

QUELLES ONT ÉTÉ LES PRINCIPALES ÉVOLUTIONS DE SEDI-ATI DEPUIS VOTRE ARRIVÉE ?

À mon arrivée, j'ai trouvé une société qui fonctionnait correctement mais qui vivait un peu cachée. On a donc mis en place une plus grande communication sur nos activités et notre spécialisation dans les environnements extrêmes. Cette stratégie a fonctionné puisque nous avons connu une belle progression avec près de 5% de croissance annuelle, et une accélération ces dernières années avec une progression proche de 10%. Nous avons un vrai effet de levier avec cette communication et intégré de très beaux programmes, que ce soit en aéronautique, en spatial ou dans le nucléaire. Par exemple, en 2020 on a fait une première mondiale en démontrant pour la première fois une fonction de sûreté nucléaire devant le

réacteur d'une centrale. Nous avons pu également travailler sur une grosse partie de la chaîne Optopyro de la fusée Ariane 6 où nous avons conçu un multiplexeur pour la longueur d'onde de test de la ligne et celle de mise à feu, et tous les cordons qui permettent de véhiculer cette lumière à base de fibre optique dans des conditions extrêmes incluant des températures cryogéniques et des vibrations très importantes.

QUELLE EST LA PART DE L'EXPORT DANS VOTRE ACTIVITÉ ?

Entre 25 et 35% de notre activité est dédiée à l'export, essentiellement en Europe. Notre premier marché après la France est l'Allemagne. On commence à avoir de plus en plus de demandes qualifiées qui viennent des États-Unis. On a un beau potentiel de croissance encore à l'export. Nous avons un commercial qui est basé à Bruxelles et qui rayonne sur les pays nordiques où on a aussi un bon potentiel.

QUELS SONT VOS PRINCIPAUX MARCHÉS ?

L'aéronautique et le spatial sont les marchés prioritaires. Le marché de l'énergie est aussi important pour nous avec historiquement une part importante ●●●

SPECTROGON

State of the art products

Filtres Interférentiels

- De 200 à 15000 nm
- Passe-bande
- Passe-haut
- Passe-bas
- Large bande
- Densité neutre
- Disponible en stock



Réseaux Holographiques

- De 150 à 2000 nm
- Compression d'impulsion
- Télècom
- Accordabilité spectrale
- Monochromateurs
- Spectroscopie
- Disponible en stock



UK (parle français): sales.uk@spectrogon.com • Tel +44 1592770000
Sweden (headquarters): sales.se@spectrogon.com • Tel +46 86382800
US: sales.us@spectrogon.com • Tel +1 9733311191

www.spectrogon.com



dédiée au pétrole mais aujourd'hui, le nucléaire prend une part de plus en plus importante. Nous travaillons aussi dans le médical et les datacoms. Nos produits sont également intéressants pour les technologies quantiques puisqu'on sait mettre de la fibre optique en conditions cryogéniques.

COMMENT DÉVELOPPEZ-VOUS DES FIBRES OPTIQUES ADAPTÉES AUX CONDITIONS EXTRÊMES ?

Le premier élément consiste à savoir packager cette fibre dans de la gaine ou dans un revêtement qui va résister à cet environnement. Nous disposons de toutes les technologies : le collage, la brasure et l'enverrage, et parfois ce sont des combinaisons de ces 3 qui sont nécessaires pour tenir des environnements très sévères. Le deuxième élément est de pouvoir amener cette fibre optique dans cet environnement extrême en garantissant une herméticité avec cet environnement. C'est pourquoi nous sommes spécialisés aussi dans ce qui s'appelle les traversées étanches qui sont des mécaniques permettant d'amener la fibre du milieu normal au milieu extrême avec une herméticité parfaite. C'est notre spécialité de savoir mettre en œuvre les bonnes technologies pour répondre à ces 2 éléments en fonction de l'environnement qui nous est demandé.

OÙ EST SITUÉ VOTRE CENTRE DE DÉVELOPPEMENT ET DE PRODUCTION ?

La conception et la production sont réalisées dans nos locaux d'Evry, dans le sud de Paris. Nous disposons d'environ 2200 m² de surface avec quelques salles blanches et quelques bâtiments de production. Tout ce qui est assemblage est fait chez nous. Au niveau mécanique,

si nous faisons la conception avec des petites pièces, la production en série est sous-traitée. Les fibres optiques sont achetées à des fournisseurs et nous assemblons dans nos locaux.

EST-CE QUE VOUS AVEZ UN CATALOGUE PRODUIT OU EST-CE DE LA CONCEPTION SUR MESURE POUR DES PROJETS SPÉCIFIQUES ?

Nous avons quelques éléments sur catalogue mais 80% de nos activités consistent à répondre aux cahiers des charges de nos clients. Cela ne signifie pas que l'on ne fait que de la recherche, car nous pouvons également produire du volume avec entre 5 000 à 10 000 pièces par an. Nous sommes aussi capables de produire de petites séries lorsque nous travaillons par exemple pour des équipes du CNRS ou du CEA.

QUELLE A ÉTÉ L'ÉVOLUTION DE VOTRE CHIFFRE D'AFFAIRE DEPUIS 2016 ?

En 2016, le CA se situait aux environs de 4M€ alors qu'en 2024 le CA atteint 8M€, ce qui montre la bonne dynamique de nos activités. J'ai déposé un business plan pour atteindre les 10M€ en 2026.

QUELS SONT LES LEVIERS IDENTIFIÉS POUR Y PARVENIR ?

Nous devons nous positionner sur des marchés porteurs, et pour nous, Ariane6 est clairement l'un de ces marchés car nous allons vers une évolution de 9 tirs par an. Il faudra faire tous les composants qui iront sur chaque vol. La seconde croissance que l'on vise est la croissance externe. Nous avons des projets en cours. J'espère que dans les mois à venir, nous pourrions faire des annonces sur des sociétés avec lesquelles nous serions alliés pour gagner en synergie.

EST-CE QUE VOUS CONSACREZ BEAUCOUP D'EFFORTS EN TERMES DE R&D AU SEIN DE SEDI-ATI ?

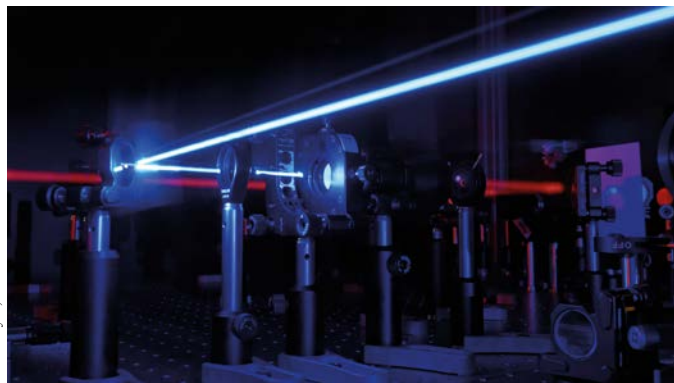
Oui, nous consacrons au moins 15% de notre chiffre d'affaires en R&D. C'est important car le niveau technologique constitue le nerf de la guerre. On essaye à la fois de saisir les opportunités de nos clients qui veulent évoluer pour progresser avec eux, mais aussi de conduire des études en interne pour identifier les technologies à maîtriser pour ne pas nous retrouver bloqués dans certains projets.

VOUS ÊTES TRÈS IMPLIQUÉ DANS LES STRUCTURES SOUTENANT LE SECTEUR DE LA PHOTONIQUE.

Oui, je suis le président du Hub Optique et Photonique de Systematic, vice-président PME de Systematic, et je siège également au conseil d'administration de Photonics France. Je suis un fervent défenseur de la photonique et mon souhait est que la photonique ne prenne pas le même chemin que l'électronique car aujourd'hui, plus de 95% de l'électronique est fabriquée en Asie. Nous devons agir pour que la fabrication de composants photoniques reste en France ou en tout cas en Europe. Il ne doit y avoir que 5 ETI - entreprises de taille intermédiaire - en France et cela n'est clairement pas assez. Cela montre combien la photonique doit se structurer pour peser. Et c'est un sujet sur lequel nous allons travailler pour que la photonique ait vraiment du poids dans le paysage industriel français et européen. Outre les restructurations, il faut qu'il y ait aussi une vraie stratégie industrielle, et veiller à ce que notre savoir-faire reste bien entre nos mains. Je suis un grand acteur de l'indépendance française et souhaite que le gouvernement évalue de près tout rachat d'une société française par un groupe étranger. Et je pense que c'est en ayant des structures plus grosses que la direction générale des entreprises regardera avec un œil différent la filière photonique. ●

Bourgogne-Franche-Comté : un terroir fertile pour l'innovation en Optique et en Photonique

Mieux connue pour ses grandes filières dans l'agroalimentaire, le luxe, l'automobile, l'énergie, la santé et les microtechniques, la Bourgogne-Franche-Comté abrite également un écosystème dynamique en optique et photonique, fruit d'une longue tradition de recherche et d'innovation. Cette région a su développer des compétences de pointe en s'appuyant sur des laboratoires de recherche reconnus internationalement, et a créé des acteurs industriels de l'optique et des lasers de premier plan.



© R. Meyer, Université de Franche-Comté

<https://doi.org/10.1051/photon/202412921>

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.

François COURVOISIER^{1,*}, Benoît CLUZEL^{2,§}

¹ Institut FEMTO-ST UMR CNRS 6174, Université de Franche-Comté, Besançon, France

² Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, UMR CNRS 6303, Université de Bourgogne, Dijon, France

* francois.courvoisier@femto-st.fr

§ benoit.cluzel@u-bourgogne.fr

Une riche tradition en optique physique

Les recherches en optique ont fait partie de l'ADN des chaires de physique des Universités de Bourgogne et de Franche-Comté tout au long des XIX^e et XX^e siècles. Forte de travaux pionniers en holographie, métrologie, en dynamique solitonique et en microscopie champ proche dans la seconde moitié du XX^e siècle, la région Bourgogne-Franche-Comté possède une longue tradition d'excellence dans la recherche académique en optique physique. Au-delà de travaux de recherche fondateurs comme ceux de Pierre-Michel Duffieux pour l'optique de Fourier dès 1940 ou de Michel Remoissenet pour les solitons, les acteurs académiques ont contribué à son épanouissement au niveau national et international. Par exemple, le bisontin Jean Bulaboïs¹ a créé la Société Française d'Optique en 1983 ; John Dudley, professeur à l'Université de Franche-Comté et président de la Société Européenne de Physique (EPS) de 2013 à 2015, a promu à l'UNESCO et à l'ONU l'organisation en 2015 de l'année internationale de la lumière, devenue aujourd'hui la journée internationale de la lumière le 16 Mai de chaque année.

Au tournant du millénaire, les thèmes précurseurs ont évolué vers le développement des communications optiques, l'optique du champ proche et l'optique non linéaire alors en plein essor, faisant aujourd'hui de la région Bourgogne-Franche-Comté un territoire de recherche reconnu pour la nanophotonique, la photonique ultra-rapide, la dynamique non linéaire, les supercontinuum, l'intelligence artificielle en optique ou encore l'information quantique. Parallèlement à ces avancées académiques, le tissu industriel régional a également vu une forte croissance de ses activités au cours des dernières décennies, capitalisant sur un historique dans l'horlogerie, la lunetterie, et les microtechniques.

¹ Jean Bulaboïs, premier président de la SFO, nous a quittés en 2024. Photoniques l'avait interviewé en 2008 pour les 25 ans de la SFO. Photoniques 37, septembre-octobre 2008. Retrouvez l'article publié dans ce numéro en son hommage.

Acteurs industriels clés et écosystème

La région abrite des fleurons industriels comme Safran Electronics & Defense, implantée à Dijon, et Optec Industries, spécialisée dans les systèmes de contrôle qualité par voie optique. Essilor Luxottica fabrique des verres de lunettes à Dijon et y a basé un centre d'innovation dédié au développement de nouveaux verres optiques. FCI (France Chirurgie Instrumentation), basée depuis plus de 30 ans en Franche-Comté, y conçoit et commercialise des dispositifs médicaux pour l'ophtalmologie. A Besançon, Digital Surf, spécialisée en métrologie dans les logiciels d'analyse de surface, après 30 ans d'existence, est un fournisseur de grands noms de l'optique comme Leica, Mitutoyo ou Zeiss. Photline technologies, créée en 2000, issue de recherches à FEMTO-ST autour des technologies de modulateurs intégrés en niobate de lithium, est devenue membre du groupe iXblue puis Exail. L'entreprise s'est taillée une place de choix dans le développement de modules optiques et RF pour les télécommunications, le spatial et les lasers. Cheval frères et Laser Cheval, fabricants de lasers industriels dès 1974, sont des références incontournables en usinage laser, en particulier pour la joaillerie et le luxe. La proximité du Jura suisse est ainsi un atout pour l'économie régionale. L'industrie lunetière est également une marque de fabrique du Haut-Jura : la ville de Morez concentre la plupart des acteurs français. Côté poids lourds industriels, la région compte également le CEA Valduc et Stellantis (ex Peugeot-PSA) qui ont de nombreuses activités en optique et photonique pour des applications nucléaires d'une part, et projection, visualisation et détecteurs

pour le côté automobile. Le Grupo Antolin, référence mondiale des composants pour l'industrie automobile a d'ailleurs récemment choisi la technopole du Grand Besançon pour installer son centre de production et R&D de 500 personnes dédié aux systèmes d'éclairage intérieur.

Continuum Formation-Recherche-Innovation

La région Bourgogne-Franche-Comté accueille deux universités pluridisciplinaires, l'Université de Bourgogne et l'Université de Franche-Comté, une université technologique (UTBM), ainsi qu'un grand nombre d'écoles d'Ingénieurs (SUPMICROTECH-ENSMM et ISIFC à Besançon, Polytech, ESTP, ESEO et Institut Agro à Dijon, ISAT Nevers, Arts et Métiers de Cluny...) rassemblant au total 60 000 étudiants.

Du côté de la recherche académique, associés au CNRS et comptant à eux deux plus de 1100 personnels, le Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne ICB et l'Institut FEMTO-ST sont les poids lourds locaux. Ces deux instituts couvrent quasiment tout le panel des activités scientifiques en ingénierie, sciences physiques et sciences des matériaux. Environ 200 chercheurs et doctorants développent leurs recherches au sein des départements Optique à FEMTO-ST et Photonique à l'ICB. Depuis plus d'une vingtaine d'années, les deux laboratoires collaborent sur de nombreux domaines high-tech en photonique comme la plasmonique, la photonique non linéaire et les technologies quantiques, et co-organisent des événements de portée nationale et européenne tels que le congrès biennal de la SFO (Optique Dijon 2021, Optique BFC 2026), les French Photonics Days de Photonics France à Besançon en 2024 ou le congrès EOSAM 2023 de l'EOS à Dijon.

En s'appuyant sur ces laboratoires, une offre de formation diversifiée en optique et photonique est proposée aux étudiants locaux aussi bien qu'internationaux. Le continuum Formation-Recherche en Bourgogne-Franche-Comté est structuré régionalement au sein de l'Ecole Universitaire de Recherche (EUR) EIPHI Graduate School financée par France 2030. Dans ce cadre, trois Masters internationaux (Figure 1) forment chaque année une soixantaine d'étudiants aux sciences de la lumière et aux technologies quantiques pour lesquelles la photonique est habilitante. A ce titre, les trois Masters participent au projet national QuantEDU-France lauréat de l'AMI Compétences et Métiers d'Avenir en technologies quantiques, coordonné par l'Université Grenoble Alpes. Le master QuantTEEM bénéficie du programme Erasmus Mundus, en partenariat avec les universités de Kaiserslautern (Allemagne) et de Aarhus (Danemark). L'ouverture au monde professionnel se caractérise notamment par une filière technologique historique au Lycée Victor Bérard de Morez (Bac PRO Optique Lunetterie et BTS Optique Systèmes Photoniques entre autres), nationalement reconnue par les entreprises, ainsi que par des parcours en apprentissage dans les Master PPN et E-PhoT. Enfin, adossé au master E-PhoT et à FEMTO-ST, le CMI PICS (Cursus de Master en Ingénierie Photonique, micro et nanotechnologie, temps-fréquence) est

Figure 1. Trois Masters Internationaux membres de la Graduate School EIPHI en région Bourgogne-Franche-Comté et acteurs du projet QuantEDU-France forment des étudiants de tous horizons aux métiers qui mettent en œuvre les technologies issues des sciences de la lumière.



MASTER PPN – PHYSICS, PHOTONICS & NANOTECHNOLOGY

Une offre de formation de haut niveau par la recherche et l'insertion professionnelle dans les domaines universitaires et industriels à la pointe de l'innovation exploitant les concepts de la physique moderne et des Sciences de la Lumière.

<https://blog.u-bourgogne.fr/master-ppn/>



MASTER E-PHOT

Un programme de cours complet couvrant les aspects théoriques, expérimentaux et d'ingénierie de la photonique, des micro et nanotechnologies, de la métrologie temps-fréquence, de la théorie de l'information et des systèmes complexes.

<https://physique.fondamentale-application-pics.ubfc.fr/>



MASTER QUANTEEM

Erasmus Mundus Master in Quantum Technologies and Engineering. Un master international offrant une formation de haut niveau dans le domaine en pleine expansion des technologies quantiques.

<https://www.quanteem.eu>



une formation universitaire sélective sur 5 ans visant à préparer des chercheurs et/ou ingénieurs à la fois sur le plan pratique et fondamental, et mettant l'accent sur l'expérience en entreprise et la mobilité internationale.

La région Bourgogne-Franche-Comté bénéficie par ailleurs de structures efficaces de transfert technologique telle que la SATT Sayens ou la fondation FC'INNOV. Ces entités facilitent la maturation des technologies issues des laboratoires locaux et leurs applications industrielles. Par exemple, Femto Engineering, centre de développement technologique prolongeant la recherche de FEMTO-ST au sein de FC'INNOV, assure la montée en TRL et des prestations industrielles en usinage et traitement du surface par laser femtoseconde, en biopuces plasmoniques, et en technologies/composants intégrés sur niobate de lithium. A Morez, la plateforme DISO, au sein du Lycée Victor Bérard, complète ce tableau et offre son savoir-faire et celui de ses étudiants en termes de développement et d'intégration de solutions optiques.

Un soutien régional fort et des plateformes technologiques ouvertes aux entreprises

Outre DISO et fortes d'un soutien régional continu au travers notamment d'appels à projets régionaux, les plateformes technologiques des laboratoires ICB et FEMTO-ST sont reconnues au meilleur niveau national et international dans leurs spécialités. La centrale MIMENTO de FEMTO-ST, membre du réseau national RENATECH piloté par le CNRS, est identifiée comme un centre de référence pour la micro-nanofabrication sur 1300 m² de salle blanche, avec une expertise reconnue en micro-nano-optique, micro-nano-acoustique et Microsystèmes Opto-Electro-Mécaniques (MOEMS). La plateforme ARCEN-CARNOT à l'ICB est membre du réseau RENATECH+ et héberge les instruments de fabrication et de caractérisation de la matière structurée à l'échelle nanométrique, complémentaire à la centrale bisontine. Enfin, la plateforme SMARTLIGHT, mutualisée entre ICB et FEMTO-ST met au service des chercheurs et des entreprises un ensemble unique d'outils de caractérisation et d'instrumentation en optique-photonique. Elle est dédiée à la manipulation et l'analyse spatiale, spectrale et temporelle des interactions lumière-matière, en lien avec les enjeux de l'intelligence artificielle et avec un intérêt particulier pour la matière micro et nanostructurée et les phénomènes ultrabrefs. Pour son déploiement et sa montée en performance, la plateforme SMARTLIGHT a été labellisée EQUIPEX+ en 2022. En 2024, SMARTLIGHT intègre le réseau de plateformes distribuées du PEPR LUMA qui cofinance le projet, ouvrant ainsi ses portes aux scientifiques de ce programme exploratoire. Forte de ces succès, SMARTLIGHT met en œuvre un ensemble d'équipements uniques : sources laser ultra-rapides, microscopies multimodales, caractérisation-acquisition de signaux électroniques à haute cadence jusqu'à 100 GHz, fabrication additive sur fibres optiques, circuits photoniques intégrés.



Figure2. SMARTLIGHT- une plateforme ouverte au service de l'excellence scientifique et de l'innovation pour l'émergence de nouvelles technologies photoniques dans lesquelles l'intelligence artificielle et les sciences de la lumière tirent parti l'une de l'autre.

Une recherche académique visible à l'international

Les recherches en Bourgogne-Franche-Comté couvrent un très large spectre en optique-photonique essentiellement sous quatre thèmes principaux.

Les recherches en plasmonique et en nanophotonique s'intéressent aux propriétés optiques de la matière structurée à l'échelle nanométrique et au développement de nouvelles

Votre partenaire pour l'optique de précision et pour vos systèmes optiques.

SPECTROS SA 4107 Ettingen Suisse Tel.+41 61 726 20 20

HAAG-STREIT SPECTROS

www.spectros.ch Look closer. See further.

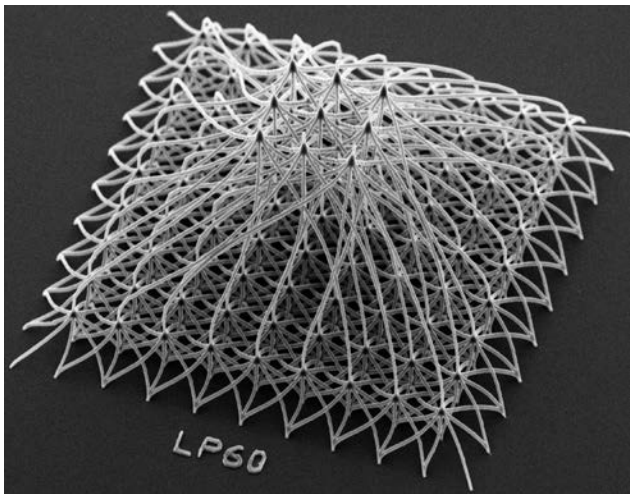


Figure 3. La photonique représente une alternative prometteuse pour réduire drastiquement les coûts énergétiques de l'intelligence artificielle. Au sein de SMARTLIGHT, des chercheurs ont mis en œuvre des réseaux de neurones photoniques 3D larges et entièrement parallèles et les ont entraînés pour atteindre des performances sans précédent. Ces technologies d'impression 3D de guides photoniques seront au cœur de la future startup LightSpring Photonics.

fonctionnalités miniaturisées et intégrées dans la matière (capteurs, nanoantennes, laboratoire sur puce, puce photonique, circuits neuromorphiques, ...).

Les recherches en optique non linéaire analysent la dynamique de systèmes ouverts ou fermés et développent de nouvelles technologies de sources laser, supercontinuum, peignes de fréquences exploitant les propriétés physiques inhérentes à ces systèmes. Les recherches en dynamique non linéaire ont tout particulièrement permis de faire émerger des recherches actuellement très visibles à l'international sur le développement de systèmes d'intelligence artificielle photonique (cf Fig 3). Cette activité intègre également une recherche orientée vers le développement de nouveaux matériaux et de nouvelles fibres optiques pour l'infrarouge moyen, depuis la fabrication des matériaux vitreux de base et leur étirage sous forme de fibres optiques jusqu'à l'étude de leurs propriétés non linéaires.

Les recherches en optique ultra-rapide se concentrent sur les interactions laser-matière femtosecondes pour le contrôle cohérent, l'alignement moléculaire, la filamentation, les interactions laser-plasma et le micro-usinage laser.

Les recherches en physique et optique quantique recouvrent à la fois des aspects théoriques et expérimentaux pour l'imagerie et l'information quantique, et de l'ingénierie pour de nouvelles sources et détecteurs, les capteurs, la cryptographie, les communications quantiques et les processeurs optiques dédiés à l'intelligence artificielle.

Les deux laboratoires FEMTO-ST et ICB sont des acteurs importants de la communauté française et internationale, avec en particulier le portage de projets d'envergure comme la coordination française de PhotonHub, projet européen accélérant

l'innovation en photonique des PME, le co-portage de projets ciblés du PEPR Electronique (France 2030), pour la création de nouvelles filières technologiques afin de réduire drastiquement la consommation énergétique de l'intelligence artificielle électronique grâce à des structures entièrement photoniques, ou la création d'une filière nationale de photonique intégrée sur LNOI. Le projet H2020 kW-flexiburst développe une nouvelle approche de lasers ultra-brefs et d'usinage laser tandis que 5 lauréats ERC explorent les frontières de l'optique ultra-rapide sur fibre pour les communications, les applications de la dynamique non-linéaire à des micro-résonateurs ultra-stables et à l'intelligence artificielle, l'apport de la mise en forme d'impulsions lasers dans l'interaction laser-plasma, et enfin le transport d'information à l'échelle nanométrique par plasmons de surface.

De multiples collaborations internationales en Europe, Amériques et Asie allient également entreprises et laboratoires sur des problématiques très diversifiées, allant du développement d'architectures de calcul neuromorphique à la mise en œuvre de sources laser et de capteurs à l'usage du contrôle environnemental, de minéraux géologiques et de polluants.

Startups et succès d'innovation

L'environnement de recherche est évidemment générateur d'innovation, de transfert de technologie, de création de startups et de laboratoires communs, formant un écosystème très dynamique. On peut citer parmi eux le succès récent d'Aurea Technology, entreprise créée en 2010, qui développe des compteurs de photons, des sources et des solutions complètes de communications et d'analyse quantiques, primée plusieurs fois aux Prism Awards de Photonics West et CLEO/Laser Focus World Innovation Award. Depuis 2022, l'entreprise est en forte croissance et participe au développement des réseaux quantiques dans le spatial avec Thalès et Airbus. Dans le domaine des capteurs de champs électromagnétiques, SYRAH-lab est un laboratoire commun entre FEMTO-ST et la société savoyarde Kapteos pour le développement de sondes optiques intégrées pour la 5G et les environnements extrêmes. 2025 devrait également voir le lancement de la startup LightSpring Photonics qui proposera des solutions de packaging photonique pour le prototypage de circuits intégrés photoniques en s'appuyant sur des solutions de fabrication 3D développées à FEMTO-ST (cf. Figure 3).

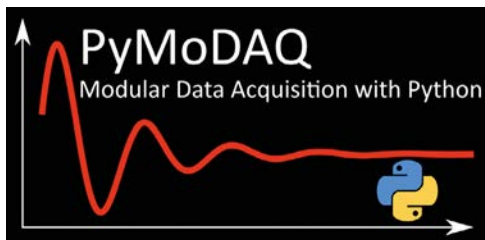
En conclusion, la région Bourgogne-Franche-Comté se distingue par un vivier de startups prometteuses, laboratoires, entreprises et innovations en photonique. Le dynamisme de ses acteurs industriels et académiques témoigne de son intégration réussie dans l'écosystème de l'innovation, à l'échelle européenne et internationale, offrant ainsi de belles perspectives de rayonnement et de développement pour cette filière d'avenir. Cela constitue aussi pour le territoire un formidable vecteur d'attractivité pour des profils talentueux et motivés, pour contribuer aux réussites et aux innovations des acteurs académiques et industriels en optique et photonique en région Bourgogne-Franche-Comté. ●

Le logiciel PyMoDAQ : acquisition, analyse et diffusion de données

Sébastien J. WEBER*

CEMES-CNRS, Université de Toulouse, 29 rue Jeanne Marvig, 31055 Toulouse, France

* sebastien.weber@cemes.fr



La donnée, depuis son acquisition dans le laboratoire jusqu'à sa publication en passant par son analyse, joue un rôle central dans la vie des scientifiques. Cet article explicite la notion de données expérimentales FAIR et présente PyMoDAQ un logiciel open-source collaboratif aidant le scientifique dans chacune de ces étapes.

<https://doi.org/10.1051/photon/20412925>

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

L'acquisition de données concerne l'ensemble des disciplines expérimentales (imagerie, spectroscopies, métrologie...) possédant chacune des instruments dédiés et des techniques de mesures adaptées. Il existe une multitude de logiciels permettant l'acquisition de ces données. Ces logiciels sont soit développés pour répondre à un besoin expérimental spécifique, soit sont fournis par le fabricant de l'instrument utilisé. Tout va bien jusqu'à ce que le dispositif expérimental évolue et que d'autres instruments y soient ajoutés afin d'obtenir plus d'informations. Le plus souvent, le logiciel doit donc être complété voire réécrit si sa structure initiale ne permet pas d'évolution. A l'ère de la science ouverte, le concept de données FAIR (voir encart) joue un rôle central dans le développement de logiciels d'acquisition de données. Cet article présente les problématiques à résoudre pour avoir un

système d'acquisition de données applicable à tout dispositif expérimental et rendre les données enregistrées aussi FAIR que possible. Nous montrerons en quoi la suite logicielle open-source PyMoDAQ [1] « Modular Data Acquisition with Python » est une solution face à ces défis.

Du générique vers le spécifique, un concept pour l'acquisition des données

Que ce soit sur de grands instruments (synchrotron, laser à électrons libres, ...) ou sur une expérience de laboratoire (situation sur laquelle on se restreindra dans la discussion), le nombre d'instruments utilisés pour caractériser le processus physique d'intérêt évolue constamment. Prenons comme exemple,

une expérience classique de spectroscopie femtoseconde dans des nanomatériaux, voir figure 1. Cette expérience vise à caractériser la dynamique temporelle d'absorption de lumière de films minces métalliques [2] à une échelle de temps femtoseconde ou picoseconde. Les instruments de base nécessaires à intégrer au logiciel d'acquisition sont ici la platine de translation qui va retarder l'impulsion sonde par rapport à l'impulsion pompe et l'amplificateur à détection synchrone qui va collecter le signal de sonde transmis à la fréquence de modulation du modulateur acousto-optique (AOM). Le logiciel associé doit donc enregistrer ce signal, scalaire, en fonction d'un paramètre variable ici le délai temporel pompe-sonde *via* la position de la platine. Mais pour compléter cette mesure, on va vite avoir besoin de rajouter une caméra pour visualiser la superposition des faisceaux pompe et sonde, une mesure de ●●●

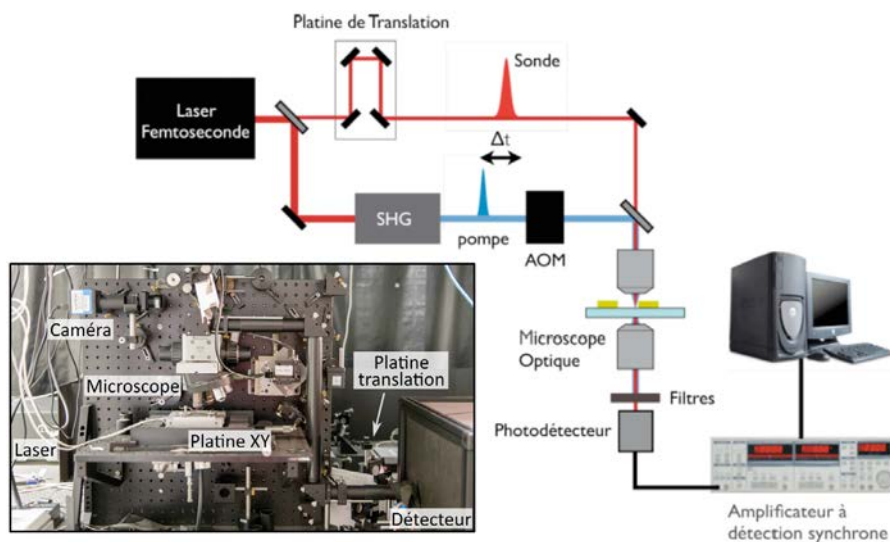


Figure 1. Dispositif expérimental d'une expérience pompe-sonde d'absorption transitoire femtoseconde. Une source laser femtoseconde est séparée en deux impulsions dont le retard est contrôlé par une platine de translation. La première impulsion, dite pompe, met le matériau dans un état excité. La seconde impulsion sonde le système à un retard donné en mesurant l'amplitude de la transmission à travers le matériau. L'expérience est répétée pour différents retards.

puissance du laser, le contrôle de la position de l'échantillon sous le faisceau focalisé etc. On s'aperçoit vite qu'un logiciel spécifique écrit pour l'expérience initiale va devoir grandement se complexifier et de nombreuses problématiques vont alors se poser comme l'ajout de nouveaux instruments, leur remplacement en cas de panne, la gestion de l'affichage des données... L'affichage devait initialement gérer des scalaires en fonction du délai (donc graphique 1D) mais si l'expérimentateur décide d'enregistrer le spectre en fonction de la position XY de l'échantillon dans le microscope, l'affichage devra gérer des données 3D. L'affichage doit donc s'adapter à la dimensionnalité des données et du scan...

Le développement de logiciels «maisons» et spécifiques à une expérience souffre d'un autre facteur déterminant: l'obsolescence. Elle est liée à plusieurs facteurs que sont : la licence du langage utilisé, la compatibilité avec le/les système d'exploitation, le remplacement ou l'ajout d'un instrument et surtout la fuite des cerveaux. La réalité est que beaucoup de ces logiciels «maisons» sont écrits par de jeunes chercheurs qui, particulièrement dans le milieu académique, sont amenés à partir après quelques années et emportent avec eux le savoir et la maîtrise du logiciel. Enfin, il y a la notion de facilité

d'utilisation. En effet pour qu'un logiciel soit utilisé, il doit avoir une documentation claire et exhaustive, une interface graphique simple mais complète et une gestion des données performante. Pour obtenir un dispositif d'acquisition de données et d'orchestration expérimentale pérenne, il est donc vital de construire ou de choisir un logiciel modulaire et athématique.

Versatilité

La versatilité ou modularité est vitale dès qu'on utilise plus d'un instrument dans un dispositif expérimental. Il s'agit donc de bénéficier d'une structure programmatique qui permette la définition du nombre et du type d'instrument sans limite intrinsèque ainsi que d'une bibliothèque d'instruments compatibles avec cette structure et dans laquelle on puisse puiser pour ajouter ou remplacer un instrument. Dans le cadre d'expériences utilisant

un microscope optique on peut citer le logiciel Micro-Manager: «[...] *μManager works with microscopes from all four major manufacturers (Leica, Nikon, Olympus and Zeiss), most scientific-grade cameras and many peripherals used in microscope imaging*». C'est un projet open-source qui contient une grande variété d'instruments dans sa bibliothèque.

Logiciel agnostique

Dans l'exemple précédent, micro-manager répond bien au critère de versatilité mais sous réserve que l'on souhaite faire une expérience autour d'un microscope. Les concepteurs ont choisi de s'adresser spécifiquement à la communauté des microscopistes avec un réel succès mais une limitation à cette thématique. Le fait que les logiciels d'acquisition soient développés autour d'une thématique ou application donnée s'explique par deux raisons : la première est qu'il est naturel d'aller directement vers la résolution de sa problématique expérimentale. Le temps qu'on y passe est déjà suffisamment important pour ne pas en investir plus dans une solution logicielle générique qui ne sera jamais utilisée dans son laboratoire. La seconde est liée aux interfaces utilisateurs. Si l'on souhaite offrir une telle interface aux utilisateurs du logiciel¹ pour leur confort et leur habitude d'utiliser ce type d'interface² alors il est relativement aisé de construire une interface dans un but (thématique ou technique expérimentale) précis mais qui aura alors tendance à être peu adaptable.

Pour résoudre à la fois le problème de modularité instrumentale, d'interface graphique et de spécificité, PyMoDAQ a pris le parti de créer deux interfaces graphiques génériques (modules de contrôle) pour

¹ Le parti pris inverse serait de n'offrir qu'une possibilité d'acquisition par l'écriture de scripts de code informatique

² Microsoft Windows est passé par là...

ses instruments : d'une part pour les détecteurs (généralisant des données et appelés *DAQ_Viewer*) et d'autre part pour le contrôle des paramètres que l'on souhaite varier dans une expérience (appelés *DAQ_Move*). Le nombre et type de ces modules de contrôle sont configurés pour chaque dispositif expérimental et ces derniers sont regroupés dans un tableau de bord « *Dashboard* », voir Figure 2. Parce que l'interface est identique pour tous les instruments d'un type donné, il est alors facile d'en charger autant qu'on veut et à tout moment d'en remplacer un. Cette solution permet le contrôle informatique complet du dispositif expérimental sans se soucier de la thématique scientifique ou de ce qu'on veut faire avec. La spécificité, si nécessaire, est obtenue en construisant des extensions au tableau de bord, qui vont être capable de prendre le contrôle programmatique des modules de contrôle. On peut ainsi facilement procéder à une expérience de type « scan » en chargeant l'extension *DAQ_Scan* qui va s'occuper de la sélection des instruments, de la façon de réaliser le scan (par exemple linéaire, aléatoire, etc.) et de sauvegarder les données d'une façon adaptée. Cette séparation permet le remplacement d'un instrument défectueux par un autre sans impacter l'extension. Il faut juste reconfigurer le tableau de bord. De nombreuses autres extensions existent et permettent de répondre à une très large variété de situations expérimentales. Cependant tout ceci n'est possible que si la bibliothèque d'instruments pilotables par PyMoDAQ est suffisamment complète. PyMoDAQ bénéficie déjà d'une bibliothèque conséquente d'instruments divers (mesures électriques, spectromètres, oscilloscopes, caméra, contrôleur de position, de rotation...) mais bénéficie surtout d'une riche documentation et de formations annuelles pour pouvoir ajouter ses propres instruments à la bibliothèque existante.

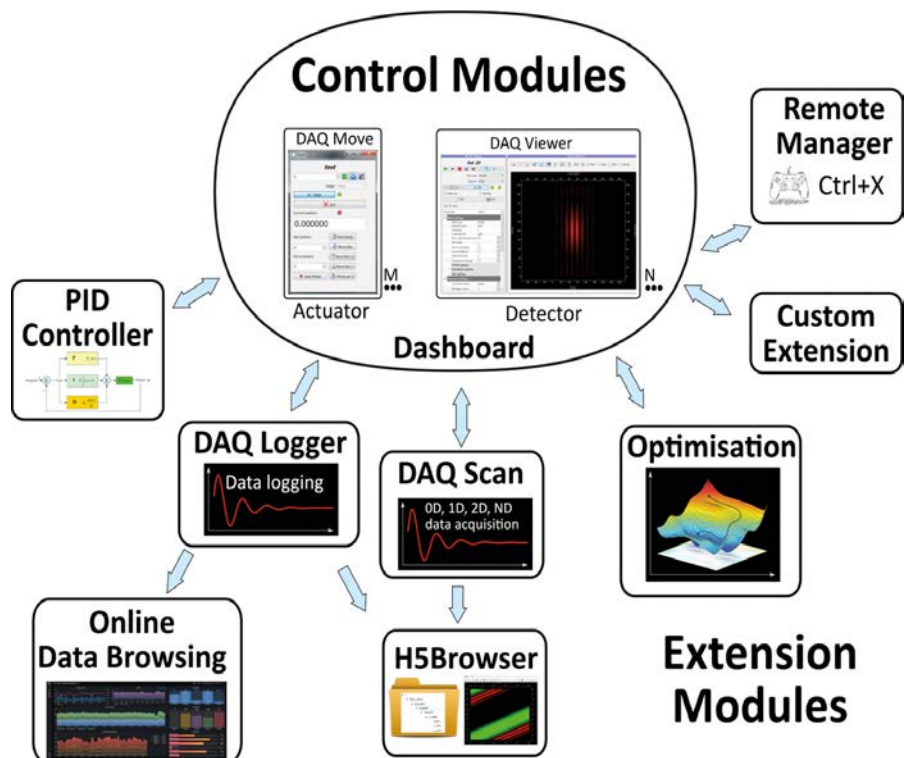
Obsolescence, open source et communauté

L'obsolescence des logiciels « maisons » est une perte nette de temps et de connaissance. La solution adoptée par PyMoDAQ tient dans la notion de projet open-source et développement collaboratif. Le choix de l'open-source, tant au niveau du langage informatique sélectionné (ici Python) et sa très grande communauté, qu'au niveau de la licence même de PyMoDAQ (licence libre dite permissive MIT) encourage les utilisateurs à s'approprier le logiciel. Chacun peut librement le télécharger, le tester, le commenter, le modifier, le compléter et enfin l'améliorer. La création d'une communauté des utilisateurs et des développeurs fait que la connaissance est partagée par plusieurs et donc préservée dans le temps.

Les données dans PyMoDAQ

La donnée est un concept central mais un peu flou dans le développement d'un logiciel d'acquisition. En effet, la donnée peut être simplement les valeurs numériques récupérées à partir d'un instrument de type détecteur. Mais si on considère les valeurs numériques issues d'un spectromètre optique, quel est leur intérêt scientifique si ces valeurs ne sont pas rapportées à un axe d'énergie ou de longueur d'onde ? Aucun ! Il faut donc y adjoindre un ensemble d'informations supplémentaires permettant de complètement caractériser la donnée numérique : ce sont les meta-données, l'ensemble des données numériques et des métadonnées constitue la « donnée » telle qu'on va la discuter dans la suite. On a tendance, et c'est bien normal, de ne penser qu'aux types de données qu'on produit dans son laboratoire sans forcément aller vers plus de généralité. Si on reprend l'exemple d'une expérience de microscopie, la donnée numérique est généralement une image à laquelle il faut associer

Figure 2. Diagramme du logiciel PyMoDAQ – Chaque instrument de l'expérience est représenté et contrôlé par un module de contrôle groupé dans un tableau de bord. Les tâches spécifiques sont alors réalisées par une extension orchestrant les modules de contrôle et leurs actions : acquisition ou modification d'un des paramètres variables.



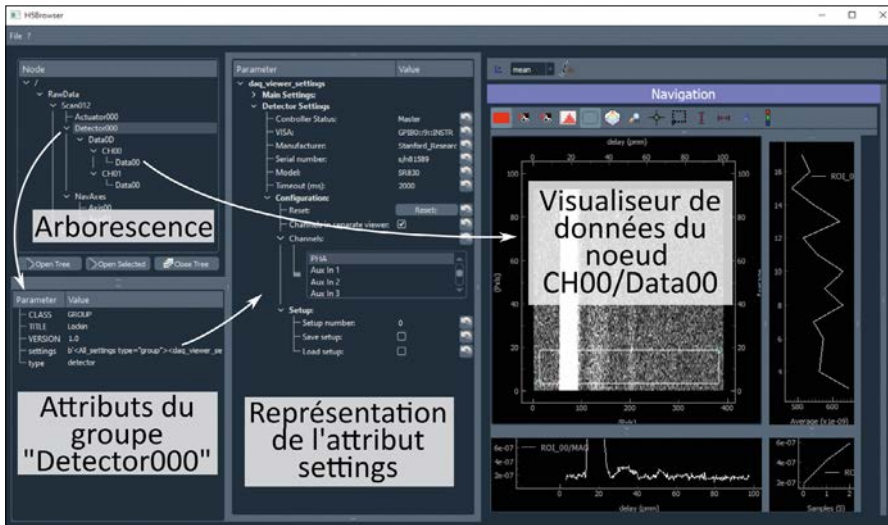


Figure 3. Exploration de donnée PyMoDAQ par l'extension H5Browser. La partie à gauche montre l'arborescence du contenu d'un fichier HDF5 obtenu par le scan de l'absorption transitoire femtoseconde d'un film d'or en fonction du délai pompe-sonde. Les attributs sont représentés en bas à gauche. Les attributs de type «settings» sont représentés au milieu, tels qu'ils étaient dans le détecteur utilisé. Les données sont représentées dans un «Data Viewer» spécifique. L'axe horizontal représente le délai pompe-sonde (déplacement de la platine en millimètre) et l'axe vertical l'acquisition de plusieurs scans. Les encarts en bas et à droite représente une extraction et moyennage partiel des données sélectionnées par le rectangle blanc (région d'intérêt).

des axes calibrés représentant la taille réelle de l'échantillon décrit par l'image. Mais si on considère la donnée comme cette image en fonction de la longueur d'onde de la lumière émise alors on obtient une donnée hyper-spectrale, un «data cube» de dimension trois. Le logiciel doit donc être capable de gérer de manière transparente aussi bien des données scalaires que des «data cube» complexes.

Les objets «données» de PyMoDAQ

Pour pouvoir décrire la très grande variété de données possible, PyMoDAQ a créé un écosystème dédié qui permet la description complète des données sous forme d'objets informatiques (valeurs numériques, axes éventuels, dimension, unités, barres d'erreurs, métadonnées diverses...), leur manipulation, leur sauvegarde (et à l'inverse leur chargement) ainsi que leur représentation graphique. Cette description générique simplifie l'écriture du logiciel d'acquisition mais peut aussi être utilisée pour analyser et manipuler les données issues de PyMoDAQ.

Visualisation des données

La visualisation des données durant leur acquisition est essentielle pour s'assurer que le dispositif expérimental fonctionne correctement³. Elle

permet aussi, à travers l'utilisation de régions d'intérêt et de l'intégration du signal dans cette région, de simplifier la représentation de la donnée brute afin de révéler un comportement anormal ou exotique signe d'un problème ou d'un futur prix Nobel⁴! Il est donc vital de pouvoir simplement visualiser ceci en direct sans devoir attendre l'analyse *a posteriori* des données collectées. PyMoDAQ possède donc des visualiseurs graphiques adaptés à la dimensionnalité des données. Ils peuvent être utilisés durant l'acquisition ou durant le post-traitement des données, voir Figure 3. Ils possèdent un ensemble de fonctionnalités permettant d'extraire rapidement des informations

sur les données affichées, d'en changer l'aspect ou encore d'y afficher des déviations standards.

La sauvegarde des données

PyMoDAQ bénéficie d'un écosystème complet d'objets informatiques décrivant les données et facilitant leur manipulation. Mais au final, ce n'est pas ce type d'objet que nous gardons sur nos ordinateurs mais des fichiers. PyMoDAQ s'est tourné très tôt vers un format de fichier binaire, compressible et organisé sous forme d'arborescence avec des groupes contenant d'autres groupes ou des tableaux de données. Il s'agit du format HDF5. C'est un type de fichier avec une empreinte sur le disque minimale et des accès en lecture et écriture sans devoir charger tout le contenu sur la mémoire vive. Outre ces avantages, chaque nœud de l'arborescence peut contenir un nombre infini d'attributs. Ces attributs permettent de stocker toutes les métadonnées d'un objet de données PyMoDAQ. Il a donc été possible de créer une relation univoque entre l'objet donnée et son stockage dans le fichier HDF5. PyMoDAQ fournit toutes les fonctionnalités pour passer de manière transparente de l'un à l'autre. De plus, les fichiers de données peuvent être ouverts par une des extensions de PyMoDAQ, le H5Browser afin de parcourir les données contenues dans le fichier, les représenter dans un visualiseur adapté et de visualiser les métadonnées. La Figure 3 montre l'interface graphique du H5Browser explorant des données obtenues grâce au dispositif expérimental de la Figure 1. Cette relation entre objet de donnée et fichier HDF5 permet l'interopérabilité des données car en utilisant PyMoDAQ et un fichier HDF5, on obtient alors un objet «donnée» python pouvant être traduit pour être compréhensible

³ Qui n'a jamais lancé une acquisition en oubliant de débloquer la source laser?

⁴ Bon ok sûrement un problème...

dans d'autres logiciels, par exemple d'analyse, ou exporté dans un autre format de fichier.

Les métadonnées pour la description et la réutilisation des données

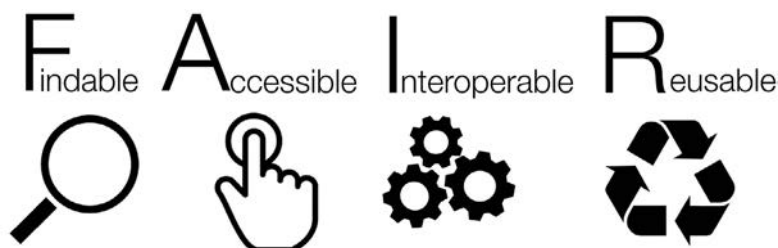
A ce stade, il manque encore un certain nombre de métadonnées afin de rendre les données réutilisables. Il faut en effet qu'elles contiennent les informations qui permettront de bien identifier ce qu'elles représentent et comment elles ont été produites, par exemple la description de la technique expérimentale utilisée. Ces deux points sont en général couverts par l'utilisation d'un cahier de laboratoire⁵ (papier ou électronique) qu'il faut pouvoir inclure totalement ou partiellement dans les métadonnées. Les cahiers de laboratoire électroniques, tel que eLabFTW, permettent la publication de ces informations et l'obtention d'un identifiant unique. L'inclusion de cet identifiant (et la possibilité d'obtenir le document associé) comme métadonnée est une solution pour répondre à cette problématique. Il faut aussi qu'on soit capable de les reproduire expérimentalement. Pour ce dernier point, il est donc vital d'enregistrer la configuration du ou des instruments mis en jeu lors de la sauvegarde des données. Ce dernier point est fait sous forme d'un attribut dans le fichier HDF5 contenant la représentation de tous les paramètres accessibles des instruments tels qu'ils le sont dans les modules de contrôle graphique du tableau de bord.

Trouvable et accessible

Pour ce qui est des concepts FAIR restant, c'est à dire trouvable et accessible, il faut pour ça s'appuyer sur des solutions externes de type entrepôts de données. Ce sont des services qui permettent de gérer les données collectées qui peuvent être installés localement ou à l'échelle d'une institution. Parmi les solutions existantes,

⁵ Plus connu sous son petit nom de cahier de « manip »

Le concept de donnée FAIR englobe les notions de production et de publication de données de manière à les rendre « Facile à trouver », « Accessible », « Interopérable » et « Réutilisable ». Ce principe est le prérequis d'une science ouverte, où les données, en particulier celles issues des institutions publiques doivent pouvoir être utiles à la société et donc en premier lieu être faciles à trouver et compréhensibles. L'interopérabilité vise à pouvoir facilement visualiser et utiliser les données dans divers logiciels et donc sa structure doit être bien documentée.



on peut citer DataVerse et NOMAD. Pour rendre les données trouvables ces services doivent analyser les données et en extraire les métadonnées nécessaires pour décrire l'expérience qui les a générées et éventuellement la technique expérimentale. NOMAD qui s'intéresse particulièrement aux sciences des matériaux est capable de classifier des données comme issues de diffraction aux rayons X, spectroscopie électronique de pertes d'énergies etc... NOMAD peut alors fournir un référencement unique pour ces données qui pourront être citées et partagées. A noter qu'il est possible de définir un standard de donnée sur NOMAD et/ou un standard associé à une technique expérimentale ou thématique scientifique. Un projet est en cours pour rendre les données PyMoDAQ compatibles avec l'écosystème NOMAD. La structure des données de PyMoDAQ sera ainsi

« comprise » par NOMAD mais c'est aux communautés scientifiques qu'il revient de définir les métadonnées nécessaires pour une technique expérimentale ou une thématique scientifique donnée pour enfin rendre les données complètement FAIR.

Conclusion

La production de données FAIR joue un rôle de plus en plus important dans le contexte de la science ouverte. Il est donc nécessaire d'utiliser des systèmes d'acquisition de données simplifiant leur création. La possibilité de s'appuyer sur des solutions logicielles collaboratives et modulaires, telles que PyMoDAQ, offre un réel gain de temps et de qualité depuis la conception d'une expérience jusqu'à la publication de résultats. Essayer PyMoDAQ, c'est l'adopter! ●

RÉFÉRENCES

[1] S. J. Weber, *Review of Scientific Instruments* **92**, 045104 (2021)

[2] R. Marty *et al.*, *Nano Lett.* **11**, 3301 (2011)

LA LUMIÈRE : CHAMP ÉLECTROMAGNÉTIQUE OU PLUIE DE PHOTONS ?

Claude FABRE*

Laboratoire Kastler Brossel, CNRS, Sorbonne Université, Campus Jussieu, 75005 Paris, France

*Claude.Fabre@lkb.upmc.fr



Au début du 20^e siècle, la quasi-totalité des phénomènes lumineux s'explique en considérant la lumière comme une onde électromagnétique régie par les équations de Maxwell. Mais les physiciens sont impuissants à expliquer dans ce modèle ondulatoire un phénomène récemment découvert : l'effet photo-électrique. Einstein montre qu'il s'explique simplement si on considère la lumière comme formée de grains insécables. Le physicien américain Millikan, sceptique, décide de faire des expériences extrêmement précises pour départager les deux approches...

R. Millikan

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

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 LUMIÈRE, ONDE OU PARTICULES ?

La simple observation du monde qui nous entoure, puis les expériences réalisées par les physiciens, montrent qu'on peut envisager les phénomènes lumineux selon deux approches. La première, qualifiée de corpusculaire, explique simplement, entre autres, la propagation en ligne droite de la lumière. La deuxième, qualifiée

d'ondulatoire, explique, entre autres, pourquoi deux faisceaux lumineux qui se croisent n'interagissent pas. Les physiciens sont donc partagés. Newton, tenant de l'approche corpusculaire, a aussi découvert les « anneaux de Newton », phénomène ondulatoire. Il suggère une analogie entre la lumière et les ondes à la surface de l'eau provoquées par la chute d'une pierre (la particule).

Vers le début du 19^e siècle, Young puis Fresnel montrent que le modèle ondulatoire permet de faire des prédictions quantitatives précises sur les différents phénomènes lumineux, en particulier sur les interférences et la diffraction. Ils finissent par l'emporter sur l'approche corpusculaire car cette dernière ne permet pas ces prédictions précises.

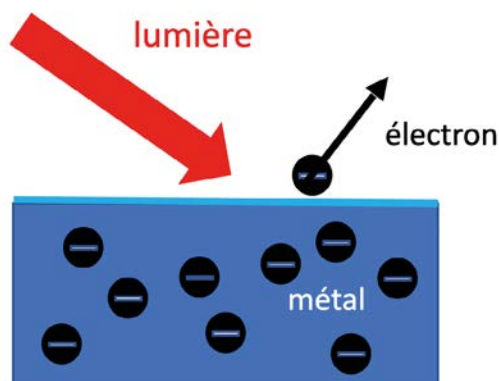
Au 19^e siècle un nouveau concept-clé émerge des recherches sur les phénomènes électriques et magnétiques, celui de champ, entité qui existe en tout point de l'espace, et même en des points où il n'y a aucune matière. En 1865 Maxwell établit les équations qui régissent l'évolution spatio-temporelle des champs électrique et magnétique : il montre que la lumière est une onde de champs électriques et magnétiques couplés. La découverte de l'électron, particule chargée présente dans la matière et qui interagit avec le champ-électromagnétique, parachève le grandiose tableau dans lequel viennent s'insérer progressivement les nouvelles découvertes de l'optique. Il s'agit là d'une des plus éclatantes avancées de la Physique.

L'EFFET PHOTOÉLECTRIQUE

H. Hertz, brillant physicien allemand, met au point en 1888 un appareillage ingénieux qui lui permet de produire et de détecter les ondes électromagnétiques prédites quelques années auparavant par Maxwell.

Au cours de ses expériences, Hertz remarque un phénomène auquel il ne s'attendait pas : lorsque son appareillage est éclairé par de la lumière ultraviolette, il constate l'apparition entre les électrodes de son dispositif d'une étincelle qui témoigne de l'existence d'électrons libres qui ont été arrachés à la surface de l'éclateur par l'onde électromagnétique. Une surface métallique peut donc émettre des électrons sous l'effet de la lumière : il y a transfert d'énergie de la lumière aux électrons, et l'on appellera « *effet photo-électrique* » ce phénomène découvert fortuitement, qui est à l'origine de nos photo-détecteurs.

Des investigations plus détaillées montrent l'existence d'un seuil f_s pour la fréquence f de la lumière incidente : si $f > f_s$, il y a bien apparition d'électrons libres par effet photo-électrique. Par contre le phénomène disparaît totalement si $f < f_s$, quelle que soit l'intensité de la lumière. Ce comportement discontinu, par tout ou rien, est



inhabituel dans le cadre du modèle ondulatoire de Maxwell, où les paramètres caractéristiques varient plutôt continûment en fonction de l'excitation incidente. Malgré les efforts des théoriciens ce comportement ne trouve pas d'explication basée sur les équations de Maxwell.

L'EXPLICATION D'EINSTEIN

Dans son article de 1905 Einstein s'appuie sur la formule de Planck, qui donne le spectre de la lumière émise par un corps chauffé (le « corps noir »). Il en déduit théoriquement l'expression de l'entropie de ce rayonnement et montre qu'elle coïncide avec celle d'un gaz parfait de particules ayant chacune une énergie hf , où h est la constante de Planck : Tout se passe comme si la lumière était formée de particules localisées, appelées « quanta » de lumière par Einstein, qui sont insécables et sans interaction mutuelle.

Einstein fait alors un bilan d'énergie sur ce processus, non pas sur l'ensemble du rayonnement, *mais au niveau des particules individuelles mises en jeu dans le processus*, dans lequel un quantum de lumière unique communique son énergie à un électron unique du métal. L'électron s'extrait du métal avec une énergie cinétique finale $E_c = mv^2 / 2$ donnée par :

$$E_c = hf - W$$

où W est l'énergie d'extraction caractéristique du conducteur. L'énergie cinétique étant positive, ce processus ne se produit que si $f > f_s$, avec $f_s = W/h$. L'existence d'une limite en fréquence, qui intriguait toute la communauté des physiciens, trouve avec Einstein une modélisation on ne peut plus simple. Son raisonnement implique de plus qu'il y a une relation linéaire entre l'énergie de l'électron et la fréquence de la lumière.

L'ennui majeur de l'approche d'Einstein est que, si l'on adopte ce modèle théorique corpusculaire pour la lumière, on doit renoncer aux indéniables succès de l'approche ondulatoire dérivée des équations de Maxwell (interférences, diffraction, diffusion...). Tout l'édifice théorique élaboré patiemment au cours du 19^e siècle, et en accord quantitatif précis avec les observations expérimentales, s'effondre.

Le modèle corpusculaire d'Einstein est accueilli avec grande réticence, ●●●

R. MILLIKAN

Né en 1868 dans l'Illinois, Robert Millikan fait ses études de physique à l'université Columbia à New York, puis à Berlin auprès de Planck. Il obtient son PhD en 1895. Il est nommé professeur à l'Université de Chicago, puis à Caltech dont il devient le directeur jusqu'à sa retraite en 1945. Il décède en 1953. C'est un expérimentateur de génie. Outre ses travaux sur l'effet photo-électrique, il est célèbre aussi pour un tour de force expérimental : il réussit à insérer un électron unique dans une gouttelette d'huile. Il déduit de son mouvement une valeur très précise de la charge électronique.

c'est le moins que l'on puisse dire, par la communauté des physiciens, qui n'a nullement envie de « jeter le bébé avec l'eau du bain ». L'hypothèse des quanta lumineux pose plus de problèmes qu'elle n'en résout. Elle est universellement rejetée.

R.A. MILLIKAN ET SON EXPÉRIENCE

Millikan est lui aussi très réticent sur l'approche d'Einstein. Dans les années 1910 il entame des travaux expérimentaux sur l'effet photo-électrique dans le but de montrer que la formule d'Einstein est erronée. Il utilise une enceinte à vide contenant une électrode métallique, souvent un alcalin. Une des difficultés de l'expérience est que la surface du métal s'oxyde et se salit avant d'être mise sous vide, perturbant par là même le processus d'émission. Millikan met au point un « couteau » manipulable magnétiquement de l'extérieur de l'enceinte à vide, spécialement conçu pour raboter et nettoyer la surface directement sous vide. Il passe plusieurs années à étudier successivement le processus de photo-émission à différentes longueurs d'onde grâce à un spectromètre et pour différentes électrodes. Il vérifie point par point toutes les conséquences expérimentales de l'équation d'Einstein avec une précision remarquable de 0,5% : existence d'un seuil en fréquence pour l'effet observé, variation linéaire de l'énergie de l'électron avec la fréquence, indépendance de l'énergie des électrons émis avec la distance entre la source de lumière et l'électrode. Il en déduit la valeur suivante de la constante de Planck $h=6,624 \cdot 10^{-34}$ J.

Il réalise ces expériences avec un soin extrême, car en bon physicien expérimentateur, Millikan sait que de petits défauts de l'expérience passés inaperçus peuvent induire des conclusions erronées. Mais l'expérience est têtue, et ses résultats implacables : ils prouvent sans doute possible que la lumière se comporte dans l'effet photo-électrique comme

un flux de particules et non comme une onde. Ils permettent de donner une valeur précise à la charge de l'électron et à la constante de Planck compatibles avec d'autres mesures moins précises.

Citons Millikan : *"This work resulted, contrary to my own expectation, in the first direct experimental proof, within the limits of experimental error, of the Einstein equation"*.

Au début des années 1920 de nouveaux phénomènes lumineux « corpusculaires » mettant en jeu des rayons X sont étudiés en détail par les physiciens. Ils confirment en particulier que les rayons X émis en tous sens par une source ponctuelle sont capables d'éjecter les électrons par effet photo-électrique même si la cible est très éloignée de la source: l'étalement dans l'espace de l'énergie électromagnétique prédit par les équations de Maxwell ne se produit pas.

En 1921 Compton montre que le quantum de lumière a non seulement une énergie hf , mais aussi une quantité de mouvement hf/c , comme il se doit pour une particule relativiste. La roue tourne donc et les physiciens « s'habituent » à cette étrange ambivalence de notre monde. La « cote » d'Einstein remonte : il obtient le prix Nobel de physique en 1921, « pour ses contributions à la physique théorique et, spécialement, pour sa découverte de la loi de l'effet photo-électriques ». En 1923 Millikan obtient le prix Nobel, « pour ses travaux sur la charge élémentaire de l'électricité et l'effet photo-électrique ».

ÉPILOGUE

En 1926 se met en place la Mécanique Quantique, avec des règles de quantification rigoureuses, telle qu'elle est enseignée maintenant. En l'appliquant au champ électromagnétique, on trouve que les états propres de l'énergie du rayonnement sont des « états nombre », contenant un nombre entier de particules qui ont toutes les propriétés des quanta de lumière d'Einstein. En 1963 R. Glauber introduit les états quantiques dits « cohérents » ou « quasi-classiques » qui permettent de mettre sur des bases théoriques solides l'approche « semi-classique » où la matière quantifiée interagit avec le champ classique des équations de Maxwell, ainsi que la description de l'interaction matière-lumière en termes de processus élémentaires photon par photon. Elle réconcilie en quelque sorte les tenants de l'approche ondulatoire et corpusculaire.

Outre la mise au point progressive d'une théorie rigoureuse de la dualité onde-corpuscule pour la lumière, connue sous le nom d'« optique quantique », de la dualité onde-particule, il y a une leçon à tirer de ces recherches: on a là un exemple parfait du primat de l'expérience sur la théorie en physique : Millikan, réticent, fait tout ce qu'il peut pour montrer que l'équation d'Einstein n'est pas conforme à l'expérience. Mais ses mesures montrent tout le contraire, et Millikan se rend à l'évidence, malgré son opposition initiale. Mieux, ses observations minutieuses donnent d'autant plus de poids à l'explication d'Einstein ! ●

RÉFÉRENCES

[1] The autobiography of Robert Millikan, Arno Press (New York 1980)

[2] A. Einstein, Ann. der Physik **17**, 132 (1905)

[3] R. Millikan, Phys. Rev. **7**, 355 (1916)

[4] R. Millikan, The electron and the light-quant from the experimental point of view, Nobel lecture May 23 (1924)

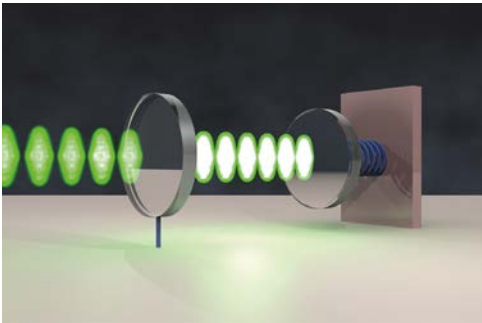
[5] G. Grynberg, A. Aspect, C. Fabre, Introduction to Quantum Optics, from the semi-classical approximation to quantized light, Cambridge University Press (2010)

OPTOMÉCANIQUE : SCIENCE ET CAPTEURS

Ivan FAVERO*

Matériaux et Phénomènes Quantiques, Université Paris Cité, CNRS, Paris, France

* ivan.favero@u-paris.fr



La science de l'optomécanique, qui étudie le couplage de la lumière au mouvement de systèmes mécaniques, a connu un essor inattendu depuis 20 ans. À présent miniaturisés, les résonateurs optomécaniques mesurent des signaux physiques avec une sensibilité et une bande-passante remarquables. Ces technologies de capteurs optomécaniques impactent aujourd'hui la science de la matière, qu'elle soit solide, liquide ou vivante.

<https://doi.org/10.1051/photon/202412933>

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.

LUMIÈRE ET MÉCANIQUE

La lumière exerce une action mécanique sur les corps, c'est un concept central de l'optomécanique. Si ce concept est depuis longtemps ancré chez l'opticien qui a piégé un atome ou une micro-bille dans une pince laser, il l'est moins à une échelle plus macroscopique, où les effets mécaniques de la lumière restent modestes en regard de l'inertie des corps. Au laboratoire, seules des expériences délicates, appuyées sur une technologie finement maîtrisée, permettent d'observer les effets mécaniques de la lumière à cette échelle. De telles expériences ont été développées pour sonder les limites fondamentales de la mesure optique dans un interféromètre.

L'interférence produite par la lumière cohérente d'un laser se réfléchissant entre deux interfaces est un outil de choix pour détecter les

mouvements relatifs de ces interfaces. Si ces interfaces sont des miroirs hautement réfléchissants, permettant à la lumière de parcourir de nombreuses fois le chemin où se forme l'interférence, on obtient un interféromètre ultra-sensible. Un flux de lumière important à travers cet instrument, permettant d'acquérir l'information à un taux plus rapide que les perturbations extérieures (vibrations externes, variations de température, bruit thermique), autorise alors des sensibilités ultimes au mouvement relatif des objets. C'est l'approche retenue il y a plus de 40 ans maintenant pour détecter le passage d'ondes gravitationnelles sur terre, qui produisent d'infimes déformations d'un tel interféromètre, de l'ordre de 10^{-20} . Pour atteindre la sensibilité nécessaire à la mesure de si petits effets, le flux de lumière dans l'interféromètre doit être

colossal, typiquement supérieur au kilowatt. A ces niveaux de puissance, les effets mécaniques de la lumière ne peuvent plus être ignorés : la lumière peut déplacer les miroirs en bout d'interféromètre. On accède alors à un second niveau de lecture : la lumière qui effectue la mesure perturbe l'instrument de mesure même. Ce problème circulaire entre mesure et rétro-action sur la mesure a été au cœur des développements historiques en optomécanique. A ce titre, on peut considérer que les détecteurs d'ondes gravitationnelles sont les premiers instruments optomécaniques, et ils ont d'ailleurs servi de matrice aux concepts du domaine. Les miroirs suspendus dans ces détecteurs oscillent à des fréquences propres de l'ordre du Hertz. Aujourd'hui, le système optomécanique canonique prend plutôt la forme d'une ●●●

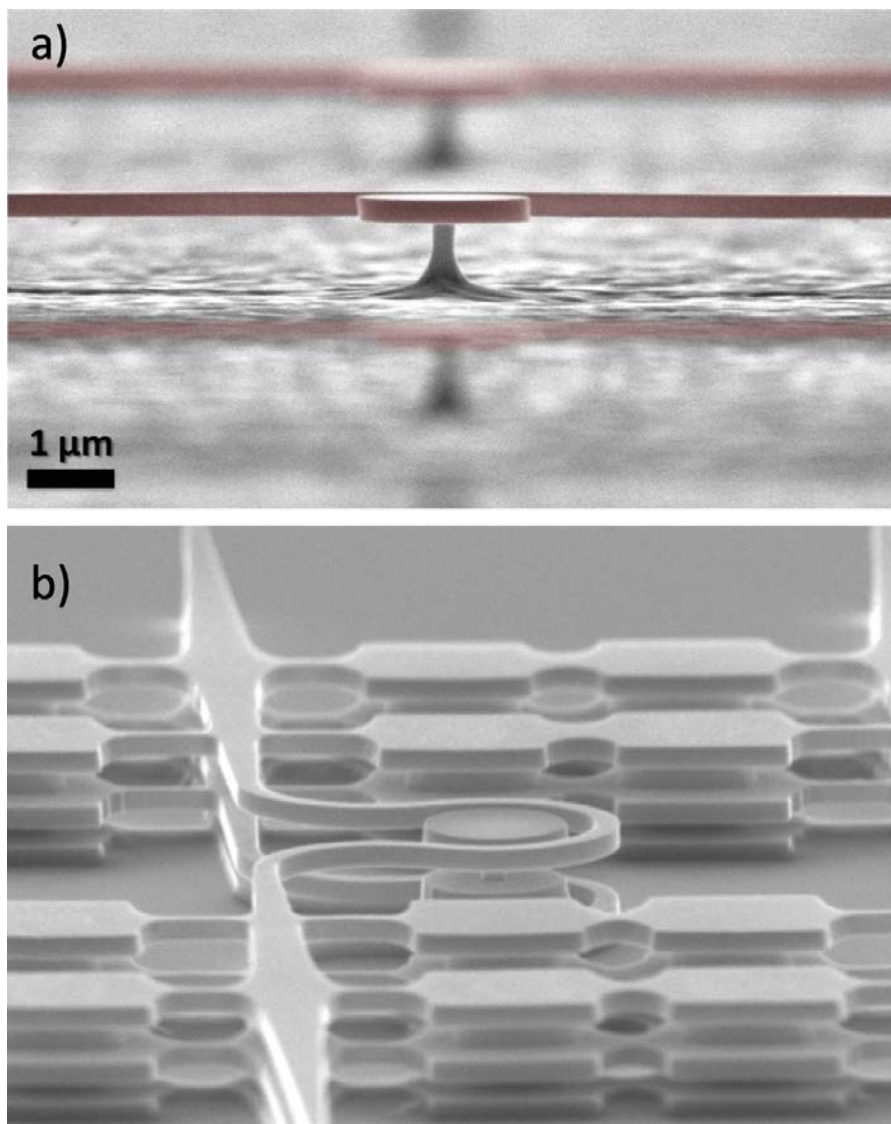


Figure 1. Disques optomécaniques en Arséniure de Gallium. a) Disque simple sur piédestal, avec guide optique. b) Disque complexe, avec circuiterie nanophotonique et suspensions mécaniques.

cavité Fabry-Pérot à miroir mobile. Cette géométrie à une dimension est en effet plus simple et conserve les ingrédients de base du problème : une haute sensibilité optique interférométrique et une capacité à se déformer élastiquement. Le miroir arrière (une masse) est monté sur un ressort, devenant ainsi un résonateur mécanique.

Depuis une vingtaine d'années, on a assisté à une miniaturisation des instruments optomécaniques, passant de l'échelle kilométrique des détecteurs astronomiques à des dispositifs qui ne dépassent guère quelques micromètres de taille et parfois moins. La raison en est simple : une telle réduction de taille s'accompagne d'une réduction de masse drastique. Les

dispositifs micro ou nano-optomécaniques rencontrés aujourd'hui au laboratoire possèdent une masse plus de quinze ordres de grandeur inférieure à la dizaine de kilogrammes des grands miroirs suspendus aux extrémités d'un détecteur d'ondes gravitationnelles. Les effets optomécaniques s'en trouvent décuplés, y compris à des niveaux de puissance optique beaucoup plus faibles qui deviennent accessibles à des expériences de table et compatibles avec

des applications bas-coût. Par ailleurs, les progrès immenses réalisés en design et en nano-fabrication ont permis aux résonateurs micro et nano-optomécaniques d'atteindre des niveaux de performance qui n'ont rien à envier aux détecteurs d'onde gravitationnelles, bien qu'opérant dans des gammes différentes. En conséquence, une véritable zoologie optomécanique a émergé, couverte dans plusieurs articles de revues.

Ici, nous nous concentrerons sur la géométrie optomécanique circulaire, qui permet d'illustrer les développements récents. Le résonateur visible en Figure 1a est un disque optomécanique, posé sur un piédestal central. Il possède une masse d'un picogramme, et est le siège de modes de galerie qui atteignent des facteurs de qualité de quelques millions. Il est l'équivalent circulaire de la cavité Fabry-Pérot à miroir mobile : l'interférence optique au sein du mode de galerie dépend très finement de la déformation mécanique radiale du disque, qui est permise par l'élasticité de l'objet. De manière réciproque, la lumière circulant dans cette galerie produit un effet mécanique radial centrifuge sur le disque, écartant ses parois. Les dimensions de l'objet, quelque part entre l'échelle micro et nano, lui confèrent de très hautes fréquences de vibrations radiales, de l'ordre du gigahertz, qui élargissent considérablement la bande passante mécanique potentielle. Comme illustré en Figure 1b, une véritable circuiterie nanophotonique peut être déployée dans le plan du disque, pour optimiser son contrôle optique, alors qu'une structuration verticale peut être réalisée pour découpler les vibrations du disque du substrat, garantissant de hauts facteurs de qualité mécanique. Ces capacités d'ingénierie et d'intégration, combinées aux sensibilités et bande-passante extrêmes atteintes par cette optomécanique miniaturisée, offrent de nombreuses perspectives dans le domaine des capteurs et détecteurs. Nous allons l'illustrer par trois approches ci-dessous.

CAPTEURS OPTOMÉCANIQUES DE FORCES

Un microscope à force atomique (AFM) est déjà un capteur optomécanique. Le levier de l'AFM est l'élément mécanique du capteur, qui mesure les forces. Dans les protocoles, c'est souvent sa fréquence qui est mesurée : elle donne accès au gradient local de force (Figures 2a et 2b). Le mouvement mécanique est détecté optiquement par un faisceau laser. Pas de détection interférométrique ultra-sensible ici, et des fréquences mécaniques saturant au megahertz, qui restent loin des avancées récentes en optomécanique. Et pourtant les instruments AFM offrent une résolution suffisante pour imager directement des liens moléculaires, et une vitesse qui approche aujourd'hui le taux vidéo, permettant d'imager des biomolécules individuelles en action. L'optomécanique miniaturisée est une opportunité pour aller plus loin, notamment en vitesse. En effet, si la détection du mouvement est excellente, c'est la fréquence mécanique qui fixe l'horizon de la bande-passante de mesure de forces. L'optomécanique combine donc les ingrédients nécessaires. Avec une fréquence mécanique du gigahertz, on espère atteindre une résolution temporelle à la nanoseconde, mille fois meilleure qu'un AFM rapide. Les phénomènes ultra-rapides dans la matière deviendraient accessibles, ainsi que des comparaisons poussées aux simulations moléculaires numériques.

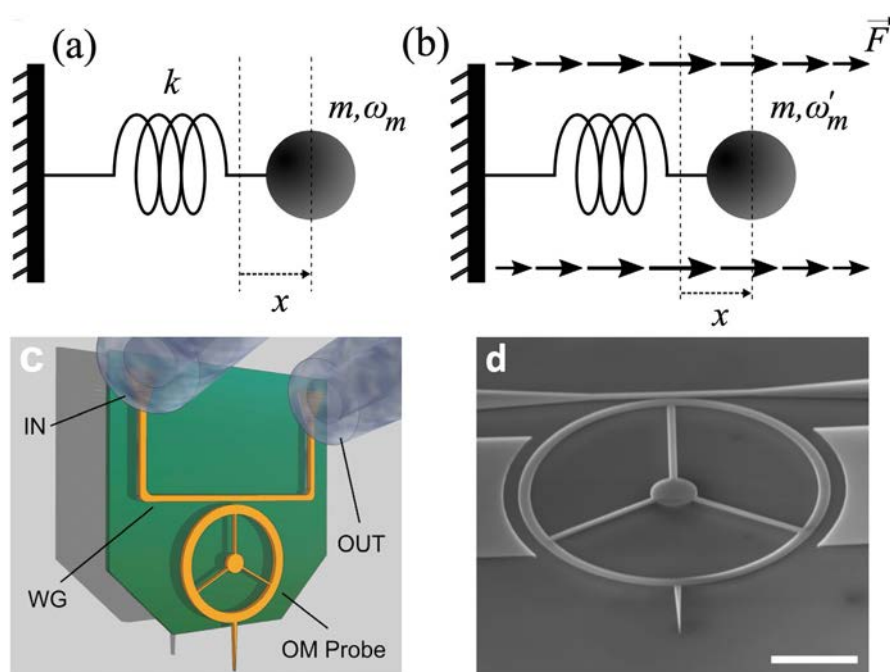
La Figure 2c illustre un dispositif optomécanique circulaire aspirant à atteindre cette résolution. Il s'agit d'un anneau en silicium d'une dizaine de micromètres de rayon et d'une épaisseur de 220 nanomètres, qui est le siège de modes optiques guidés circulairement et de modes mécaniques de vibration radiale. Une pointe nanoscopique, à la manière de celle d'un AFM pointant vers l'objet, est intégrée en bas de l'anneau, avec son mouvement vertical rigidement lié au mouvement de l'anneau. Les fréquences mécaniques atteintes sont de centaines de megahertz, et les interférences optiques

circulaires permettent de détecter aisément le mouvement Brownien de l'anneau (donc de la pointe). Cet objet combine ainsi les performances attendues. Il peut être utilisé en mode actuation : la lumière injectée est modulée à la fréquence mécanique, et les forces optiques centrifuges entrent en résonance avec l'anneau mécanique. Ce mode optomécanique « actif » permet d'abandonner les méthodes d'excitation piezoélectrique de l'AFM, pour monter en fréquence. Cette sonde optomécanique annulaire a été qualifiée par des mesures de forces à l'échelle du pixel unique [1] et récemment montée dans la tête d'un instrument AFM, intégration facilitée par la connexion de la sonde avec des fibres optiques (Figure 2c). Les chercheurs travaillent à présent à réaliser des images avec cette technologie. Le Figure 2d montre une sonde sortie de salle blanche, produite par des procédés large échelle compatibles avec un principe de sondes jetables.

OPTOMÉCANIQUE AU SEIN D'UN LIQUIDE

Le second champ d'application de l'optomécanique que nous voulons aborder est celui de la mesure des liquides. L'indice de réfraction des matériaux utilisés en optomécanique miniaturisée, bien souvent des semi-conducteurs, est largement supérieur à celui des liquides usuels. Il est donc possible d'immerger un dispositif optomécanique miniaturisé dans un liquide sans corrompre sa capacité à piéger la lumière, qui continue à interagir efficacement avec le mouvement mécanique de l'objet. La Figure 3a illustre le cas d'un disque optomécanique immergé dans l'eau. Les guides d'onde optiques amenant la lumière au résonateur, et la collectant en sortie, restent aussi fonctionnels en milieu liquide, pour les mêmes raisons. Il devient ainsi possible d'effectuer des mesures optomécaniques locales directement au cœur d'un liquide, avec une ●●●

Figure 2. Sonde optomécanique pour les forces atomiques. a) Une masse sur un ressort oscille à ω_m . b) Plongée dans un champ de force, la fréquence se déplace en proportion du gradient local de force. c) Principe d'un anneau optomécanique pour mesurer les forces atomiques, développé par les laboratoires LAAS-CNRS, CEA-LETI, et MPQ-CNRS-Université Paris Cité. d) Réalisation sur une technologie SOI (Silicon On Insulator). Barre 5 μm .



sensibilité au mouvement égale à celle obtenue à l'air, et qui suffit à résoudre le mouvement Brownien de l'objet, d'une centaine de femtomètres seulement [2]. La Figure 3b montre le spectre du mouvement mécanique d'un disque oscillant au gigahertz, mesuré dans l'air puis en immersion dans un liquide. Avec l'immersion, on observe un déplacement vers les basses fréquences et un élargissement important de la résonance de vibration. Ces effets dispersif et dissipatif révèlent l'interaction entre le corps vibrant et le liquide. Autrement dit, le capteur répond aux forces exercées par le liquide sur ses parois externes. La modélisation de ces forces

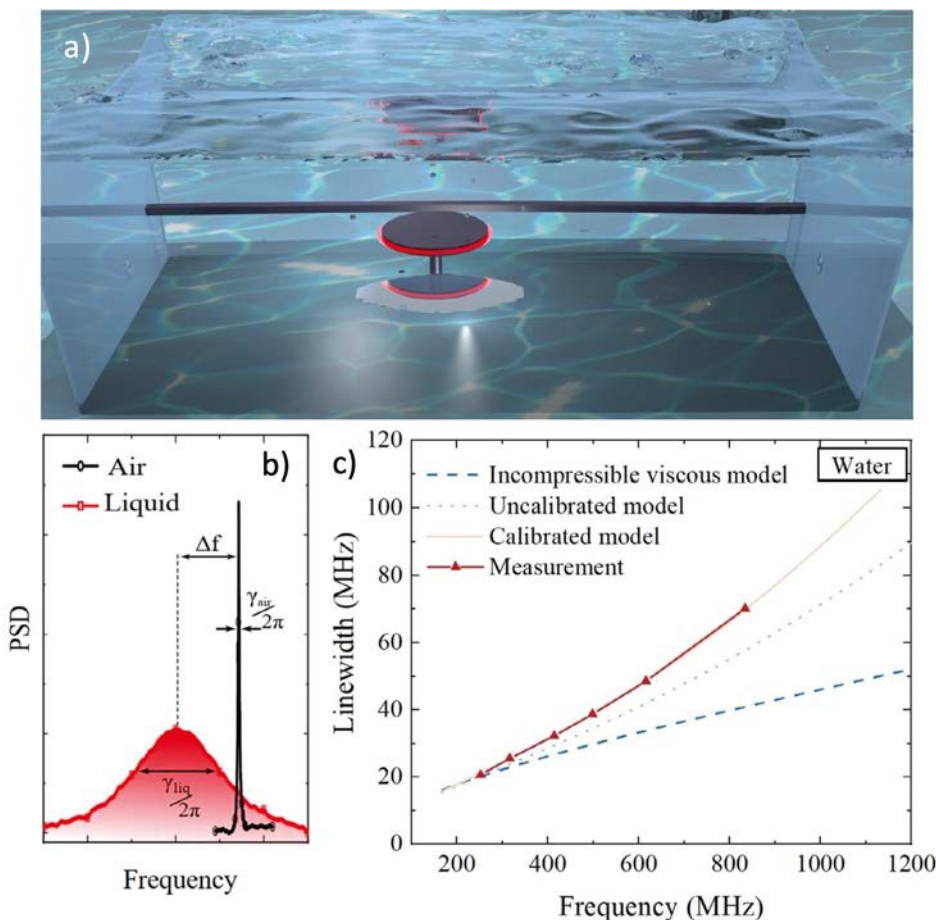
et de leur effet sur le mouvement est une tâche ardue, qui combine des problèmes d'hydrodynamique et d'élasticité. Des travaux théoriques récents ont traité ce problème pour la géométrie simple d'un disque, obtenant l'accord entre expériences et théorie présenté en Figure 3c. On y voit que les effets de compressibilité de l'eau sont essentiels à ces fréquences mécaniques élevées, un résultat non-conventionnel pour les interactions fluide-structure. Grâce à cette modélisation des expériences, on peut renverser le problème et utiliser les mesures pour effectuer une micro-rhéologie mécanique du fluide : mesurer sa viscosité, sa

densité, son élasticité. La mesure est locale, dans un volume de quelques microns cube, et peut être obtenue en moins d'une milliseconde grâce à l'efficacité de détection. Cette mesure optomécanique au gigahertz permet de sonder la dynamique rapide du liquide. Nous avons récemment utilisé ce principe pour révéler le comportement non-Newtonien d'un alcool courant aux temps courts [3].

BALANCE OPTOMÉCANIQUE POUR UN NANO-OBJET

La troisième approche que nous désirons présenter est celle de la balance optomécanique. Dans ce cas, un objet est déposé sur le résonateur optomécanique et affecte sa réponse optique comme mécanique. L'opérateur mesure le déplacement des fréquences optiques et mécaniques de résonance, et en déduit des propriétés optiques et/ou mécaniques du nano-objet. Du point de vue mécanique, le capteur ressemble alors à une balance à quartz, mais ses dimensions miniatures le rendent sensible à une bien plus petite quantité de matière, par exemple un nano-objet unique. Cette balance n'est pas que mécanique, et la mesure optique concomitante donne accès à des informations complémentaires (par exemple le volume du nano-objet, qui peut compléter l'information sur sa masse). L'utilisation de cette mesure duale, mécanique et optique, a été récemment utilisée pour élucider le mode d'évaporation d'une nano-goutte de quelques dizaines d'attolitres, en bénéficiant de la résolution temporelle autorisée par l'optomécanique (Figure 4a, [4]). La technique de la balance optomécanique a également été utilisée pour mesurer la masse et l'élasticité de nanoparticules individuelles solides, telles que celles visibles en Figure 4b. L'application en vue est ici la mesure optomécanique d'un virus unique, dont la masse et l'élasticité permettent de former une carte d'identité simplifiée. Dans ces exemples, il faut souvent connaître la position d'atterrissage du nano-objet

Figure 3. Optomécanique au cœur d'un liquide. a) Disque optomécanique miniature immergé dans l'eau. b) Spectre mécanique du mouvement Brownien du disque, mesuré par détection optomécanique dans l'air et en liquide. γ est le taux de dissipation mécanique, et Δf le déplacement fréquentiel dû à l'immersion. c) Taux de dissipation mécanique dans l'eau, pour différentes fréquences du mouvement. Comparaison aux différents modèles d'interaction fluide-structure. Le modèle du liquide incompressible n'est plus suffisant à ces fréquences.



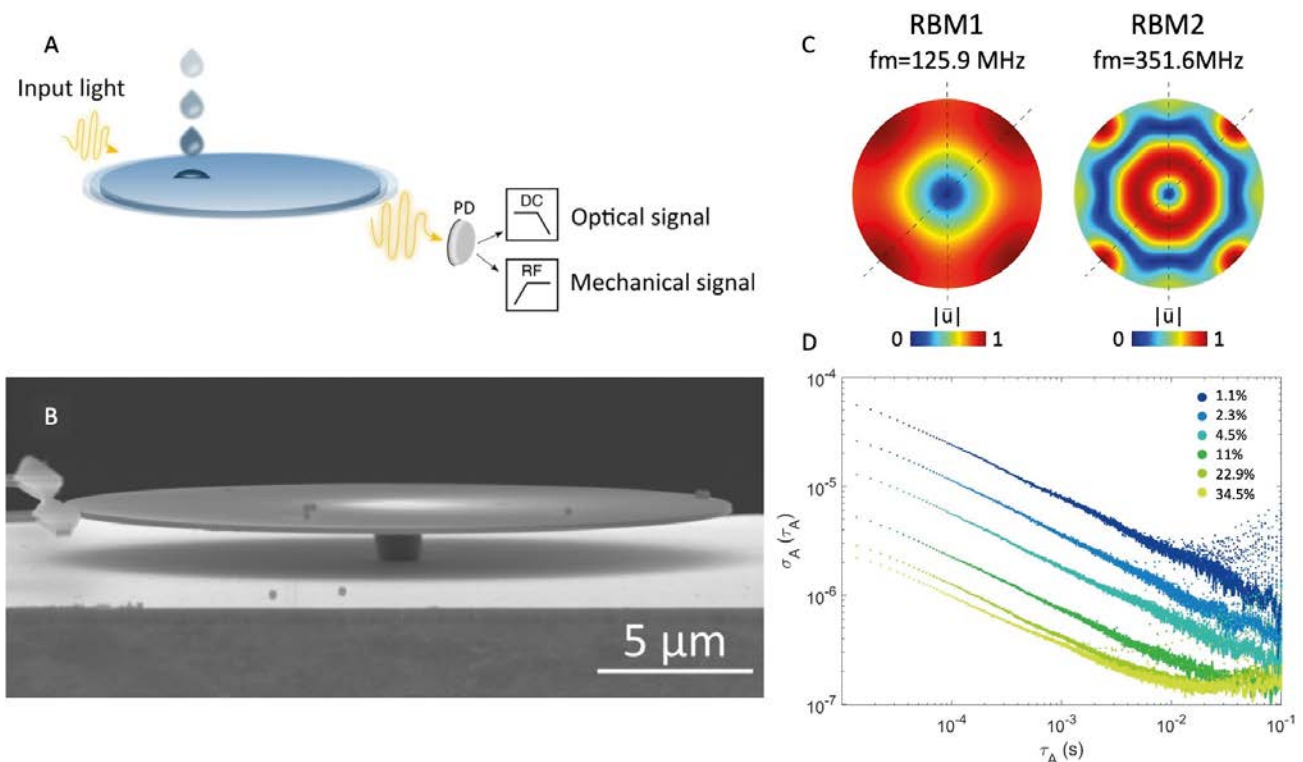


Figure 4. Balance optomécanique. a) Disque optomécanique miniature sur lequel un nano-objet individuel (ici une nano-goutte) atterrit, produisant un signal optique et mécanique en sortie. b) Une dizaine de nanoparticules solides sont tombées une par une sur une balance optomécanique. c) Différents modes mécaniques du disque peuvent être utilisés pour déconvoluer l'information. u est le vecteur déplacement. RBM : Radial Breathing Mode. d) Stabilité fréquentielle mécanique de la balance pour différentes conditions d'opération, en fonction du temps d'intégration τ_A .

sur la balance, afin de déconvoluer correctement l'information. Dans les expériences, cela peut être obtenu en visualisant *in-situ* chaque atterrissage en surface du capteur, ou en utilisant de multiples modes mécaniques et/ou optiques (Figure 4c) afin de trianguler la position de l'objet à partir des signaux optomécaniques. La stabilité fréquentielle de l'oscillation mécanique est un paramètre clé dans ces applications : tout comme la stabilité d'une horloge elle fixe notre capacité à mesurer de petits signaux et gagner en résolution dans la mesure des nano-objets. Cette stabilité atteint déjà un niveau de 100 ppb dans des conditions ambiantes d'utilisation (Figure 4d). Les balances optomécaniques miniatures en disque ont récemment été utilisées pour détecter les vibrations d'une bactérie unique [5], et sont en cours

de développement sur d'autres sujets biophysiques, amenant ici encore la sensibilité et la bande-passante que permet l'approche optomécanique.

CONCLUSION

Les domaines d'application évoqués ci-dessus couvrent l'imagerie de la matière à l'échelle atomique, la micro-rhéologie, et la mesure physique et résolue dans le temps d'objets

vivants individuels. Ces applications permettent d'illustrer la performance de l'approche optomécanique, qui offre sensibilité et bande-passante avec un compromis remarquable entre les deux. Ces exemples n'ont cependant rien d'exhaustif. Dans sa quête des effets quantiques de la lumière et de la mécanique, l'optomécanique a également réalisé des progrès remarquables, tels que l'observation des fluctuations quantiques du mouvement d'un résonateur, ou encore l'intrication entre lumière et mécanique. Une perspective naturelle sera dans un futur proche de combiner ces avancées avec des cas concrets d'applications comme ceux présentés ici. ●

RÉFÉRENCES

- [1] P. E. Allain *et al.* *Nanoscale* **12**, 2939 (2020)
- [2] E. Gil-Santos *et al.* *Nature Nanotechnol.* **10**, 810 (2015)
- [3] H. Neshasteh *et al.* *arXiv:2410.13467*, *Nature Commun.*, in press (2024)
- [4] S. Sbarra *et al.* *Nature Commun.* **13**, 6462 (2022)
- [5] E. Gil-Santos *et al.* *Nature Nanotechnol.* **15**, 469 (2020)

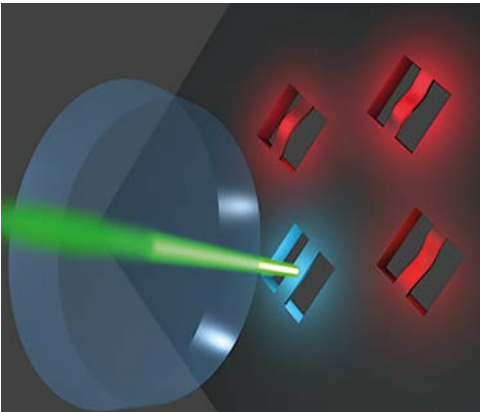
DE LA DÉTECTION DES ONDES GRAVITATIONNELLES À L'OPTOMÉCANIQUE QUANTIQUE

Pierre-François COHADON^{1,*}, Michaël CROQUETTE^{1,2}, Pierre-Edouard JACQUET¹

¹ Laboratoire Kastler Brossel, Paris, France

² Institut Néel, Grenoble, France

*cohadon@lkb.upmc.fr



Les fluctuations quantiques de la lumière limitent de façon fondamentale la sensibilité des interféromètres gravitationnels. Ce domaine a ainsi été moteur pour le développement des techniques de squeezing. Parallèlement, les progrès en nano- ou microfabrication ont permis l'émergence d'un nouveau domaine, l'optomécanique quantique, qui s'intéresse au couplage de résonateurs mécaniques mésoscopiques à la lumière, avec des applications en métrologie, mais aussi en information quantique ou en physique fondamentale.

<https://doi.org/10.1051/photon/202412938>

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 FLUCTUATIONS QUANTIQUES DE LA LUMIÈRE ET LA DÉTECTION DES ONDES GRAVITATIONNELLES

L'annonce en 2016 de la première détection des ondes gravitationnelles a suscité un intérêt considérable dans la communauté des physiciens et auprès d'un public beaucoup plus large. Au-delà des implications astrophysiques, c'est la sensibilité de l'expérience qui a marqué les esprits : elle a en effet nécessité une sensibilité de l'ordre de $h \sim 10^{-21}$, correspondant à des déplacements des miroirs inférieurs à 10^{-18} m. Le challenge relevé

pour s'affranchir des bruits classiques (bruit thermique des miroirs, bruit sismique...) a été considérable et explique les quatre décennies d'efforts expérimentaux nécessaires entre les premières propositions au début des années 1970 et cette découverte.

Bien loin de ces considérations expérimentales, Carlton Caves a identifié dès le début des années 80 les deux bruits liés à la nature quantique de la lumière qui limitent de façon fondamentale la sensibilité de ces interféromètres. Ces bruits se discutent simplement sur le système optomécanique générique : une

cavité optique dont le miroir de fond est mobile. Quand la cavité est à résonance à la longueur d'onde λ , les fluctuations $\delta\varphi_{out}$ de la phase du faisceau réfléchi par la cavité s'écrivent :

$$\delta\varphi_{out} = \delta\varphi_{in} + \frac{8\mathcal{F}}{\lambda}(\delta x + \delta x_b + \delta x_{rad}),$$

où $\delta\varphi_{in}$ est le bruit (quantique) de phase du faisceau incident (voir l'encadré), δx le déplacement que l'on veut mesurer, amplifié par la finesse \mathcal{F} de la cavité, δx_b un éventuel bruit de position et δx_{rad} le bruit quantique de pression de radiation, qui correspond aux fluctuations de position du miroir mobile induites par les

fluctuations quantiques de pression de radiation du faisceau de mesure dans la cavité. Pour une expérience seulement limitée par le bruit quantique de phase du faisceau, la sensibilité est de l'ordre de $\delta x_{min} \sim \lambda/16\mathcal{F}\sqrt{I_{in}}$ où I_{in} est l'intensité (en photons/s) du faisceau utilisé pour la mesure. Cette sensibilité est typiquement de l'ordre de 10^{-18} à $10^{-19} m/\sqrt{Hz}$ pour les interféromètres gravitationnels ou, pour des expériences table-top, 1 mW et une finesse de 10 000 à 1 μm .

Augmenter la puissance incidente permet donc d'augmenter la sensibilité, mais pas indéfiniment. En effet, au-delà des inconvénients d'une forte puissance laser (notamment le chauffage induit par l'absorption résiduelle des miroirs, qui peut les déformer et dégrader le mode-matching), augmenter la puissance augmente le second bruit quantique δx_{rad} , qui traduit à l'échelle macroscopique l'action-en-retour de la mesure. Ces deux bruits $\delta\varphi_{in}$ et δx_{rad} étant conjugués (au sens quantique du terme : deux observables qui ne commutent pas et dont le produit des fluctuations quantiques obéit à une inégalité de Heisenberg) et évoluant de façon inverse avec la puissance du faisceau laser, la sensibilité optimale est obtenue en effectuant un compromis. On aboutit à la Limite Quantique Standard (LQS) [1], le plus petit déplacement observable avec un faisceau laser dans un état cohérent. L'existence des fluctuations quantiques et leur impact sur la sensibilité de ces mesures a donc été une motivation majeure pour les premières expériences de compression des fluctuations quantiques de la lumière.

LA LUMIÈRE COMPRIMÉE EN ACTION

À partir du milieu des années 1980, de nombreux résultats expérimentaux ont été publiés sur la réduction du bruit quantique sur toutes sortes de systèmes (gaz d'atomes, cristaux non-linéaires, lasers à semi-conducteurs...), avec des niveaux de réduction de bruit d'abord modestes (d'abord quelques %,

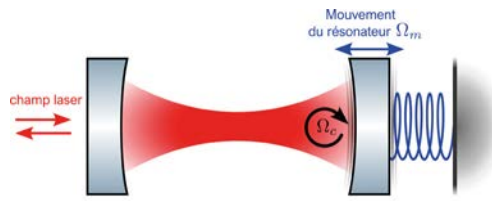


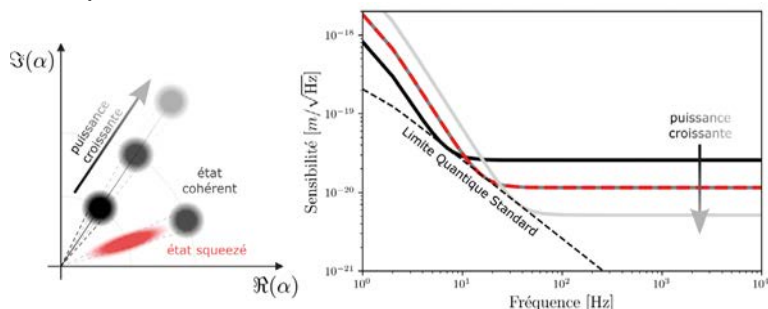
Figure 1. Représentation d'un système optomécanique générique. Un faisceau laser est incident sur une cavité optique dont le miroir de fond est mobile. Le déplacement du miroir et le faisceau sont couplés par la pression de radiation.

puis quelques dB), des pertes optiques importantes, des faisceaux de petite taille (pour optimiser les effets non-linéaires) et des fréquences d'analyse (vers 1 MHz) choisies pour leur accessibilité expérimentale (à la fois suffisamment élevées pour s'affranchir de toutes sortes de bruits techniques et suffisamment basses pour être facilement détectées).

Dès le début des années 2000, alors que les interféromètres sont pourtant encore loin d'avoir atteint la sensibilité nécessaire à toute détection d'événement astrophysique, des chercheurs préparent déjà la suite et travaillent sur des sources de lumière comprimée adaptées à ce contexte : opérant à plus basse fréquence (entre 10 Hz et 10 kHz), adaptées aux dimensions de l'expérience (avec des faisceaux de quelques cm), plus stables (avec l'objectif d'un fonctionnement 24/7 et une automatisation du contrôle des différents asservissements). Ce travail, mené en parallèle avec l'adaptation des interféromètres à de telles sources (notamment la minimisation des pertes optiques, qui sont encore plus pénalisantes avec de la lumière comprimée), a permis une démonstration de principe de la technique sur l'interféromètre GEO600 dès 2011, et sur LIGO dès 2013, ●●●

FLUCTUATIONS QUANTIQUES ET SENSIBILITÉ DES INTERFÉROMÈTRES GRAVITATIONNELS

Les fluctuations quantiques de la lumière (représentées par les disques sur la représentation du champ dans le plan complexe) correspondent à des fluctuations de la phase (angle depuis lequel on voit l'état depuis l'origine du plan), qui décroissent avec une puissance laser croissante (distance depuis l'origine, disques noir, gris et gris clair) et à des fluctuations d'amplitude (distance au centre), qui induisent des fluctuations de pression de radiation qui augmentent elles avec la puissance. L'utilisation d'un état comprimé (ellipse rouge, squeezing de la phase) permet d'atteindre la même sensibilité pour une puissance réduite. On voit sur la courbe de droite (courbe de sensibilité d'un interféromètre-modèle) l'influence de la puissance laser sur les bruits de phase (à haute fréquence) et de pression de radiation (à basse fréquence), ainsi que l'effet d'un état comprimé. Les courbes sont calculées ici pour des miroirs « en chute libre », c'est-à-dire pour des fréquences nettement supérieures à la fréquence de résonance des suspensions des miroirs.



avec un bruit diminué de 3 dB. Cette technique est utilisée depuis 2018 sur tous les interféromètres gravitationnels (Advanced Virgo, Advanced LIGO et GEO600) lors de leurs prises de données scientifiques [2]. Ces travaux se poursuivent aujourd'hui pour améliorer continuellement la sensibilité des interféromètres au gré de leurs campagnes d'améliorations successives, qui permettent de réduire encore les bruits classiques, et entraînent des exigences toujours plus fortes sur le squeezing.

L'OPTOMÉCANIQUE : REFROIDIR UN MIROIR AVEC LA PRESSION DE RADIATION...

En mettant en évidence la LQS, Caves a accordé un nouveau statut aux miroirs de l'interféromètre : de simples dispositifs pour réfléchir la lumière, ceux-ci deviennent de vrais objets physiques, qui réagissent aux fluctuations de la pression de radiation du faisceau laser de mesure. Personne ne le sait et personne ne l'appelle encore ainsi, mais l'optomécanique est née [3]. Si ces effets sont encore loin de toute démonstration expérimentale, l'idée fait son chemin qu'on pourrait réaliser des expériences similaires avec des miroirs mobiles de plus faible masse, répondant mieux à la pression de radiation. De telles expériences table-top se montent, notamment au Laboratoire Kastler Brossel, avec comme premier objectif de mettre en évidence les limites quantiques dans les mesures de position ou de générer de la lumière comprimée avec la non-linéarité optique liée à la pression de radiation. Mais ces objectifs apparaissent rapidement difficiles à atteindre : le bruit de pression de radiation ne sera finalement mis en évidence qu'en 2013 [4].

Néanmoins, le bruit thermique des résonateurs mécaniques, initialement perçu comme un bruit, particulièrement gênant dans ces expériences généralement réalisées à température ambiante, est bientôt plutôt vu comme un sujet d'étude en soi. La pression de radiation, permet

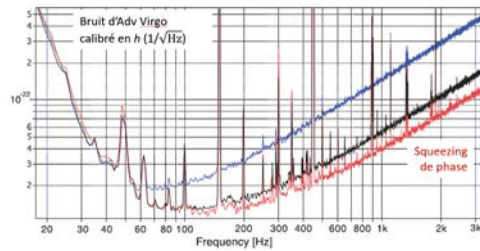


Figure 2. La réduction du bruit quantique à l'œuvre dans les interféromètres gravitationnels. Courbes de sensibilité d'Advanced Virgo dans sa configuration standard (courbe noire) et avec injection de vide comprimé sur la quadrature de phase (courbe rouge). Le gain est d'environ 3 dB à haute fréquence. La courbe bleue représente l'effet d'une compression sur la quadrature d'amplitude, qui augmente le bruit de phase et dégrade ainsi la sensibilité. Celle-ci est inchangée à basse fréquence, où des bruits classiques sont prédominants. Figure tirée de [2]. Crédit : Collaboration Virgo.

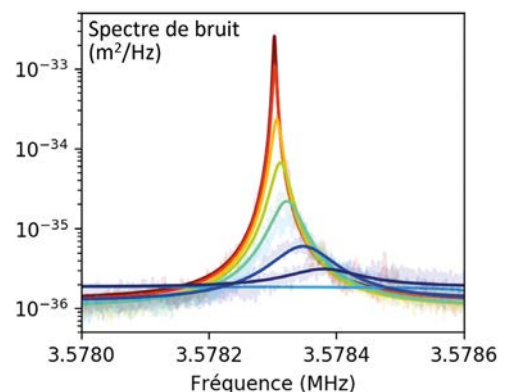
en effet d'agir sur le résonateur pour le refroidir, de façon analogue à ce qui était déjà utilisé avec des ions piégés. Une première expérience de refroidissement est réalisée au LKB en 1999 avec le mode de vibration fondamental d'un miroir plan-convexe en silice fondue : le signal sur le déplacement est alors utilisé pour appliquer en temps réel une force de frottement supplémentaire. Cette force de friction froide n'injectant pas de fluctuations dans le système, on peut montrer que la température est réduite par un facteur $1 + \Gamma_{rad}/\Gamma$, où Γ_{rad} est l'amortissement induit par la pression de radiation et Γ celui intrinsèque du résonateur mécanique. Le résultat sur la température est encore modeste : le miroir initialement à température ambiante ne voit sa température abaissée qu'à 10 K [5]. L'année 2006 voit l'introduction d'une nouvelle technique qui tire parti du couplage entre phase et intensité dans une cavité optique désaccordée : le miroir est alors refroidi par la seule pression de radiation du faisceau qui est utilisé pour mesurer son déplacement. Les premières expériences, réalisées simultanément au LKB et à Vienne, se limitent encore

à des démonstrations de principe, de la température ambiante à une température finale de quelques K [6], mais les expériences se multiplient très vite : à température cryogénique, dans le domaine optique puis micro-ondes, avec toutes sortes de géométries de résonateurs... Le graal est atteint en 2011 : pour la première fois, un résonateur mécanique est refroidi au voisinage de son état quantique fondamental [7] : les résonateurs mécaniques sont désormais des oscillateurs harmoniques quantiques (presque) comme les autres.

... MAIS PAS SEULEMENT

Le domaine continue de s'étendre pendant la décennie qui suit. À côté des systèmes déjà très répandus en métrologie et en optique ou information quantiques (atomes, ions, centres NV, cavités optiques ou micro-ondes, qubits supraconducteurs...), les résonateurs mécaniques apparaissent comme un élément supplémentaire de la boîte à outils expérimentale, avec comme point fort leurs très longs temps de cohérence (avec par exemple des facteurs de qualité mécaniques de plusieurs centaines de

Figure 3. Refroidissement d'un résonateur mécanique (micropilier en quartz, 2021) par la pression de radiation. Sous l'effet de la force de friction froide, les spectres de bruit de position s'élargissent (largeur totale) et sont réduits (diminution de la température), de la température de base du cryostat (courbe rouge, 1 K) à la température minimale atteinte (courbe bleue, température de 1 mK, correspondant à 7 phonons thermiques à la fréquence de 3,6 MHz).



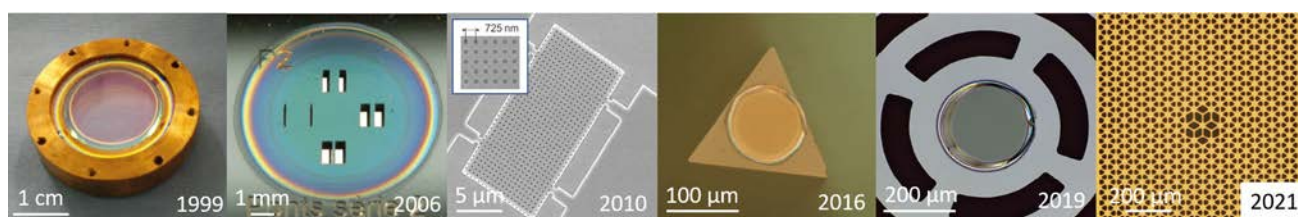


Figure 4. 25 ans d'évolution des résonateurs optomécaniques au Laboratoire Kastler Brossel. 1999 : miroir plan-convexe en silice fondue. 2006 : micropuce en silicium. 2010 : membrane à cristal photonique en InP (collaboration avec le C2N). 2016 : vue optique de la face supérieure d'un micropilier en quartz (collaboration avec l'ONERA). 2019 : oscillateur de torsion en silicium (avec un miroir de Bragg, collaboration avec le LENS Florence). 2021 : Membrane à cristal phononique en SiN. Les traitements diélectriques (1999, 2006 et 2016) ont été réalisés au Laboratoire des Matériaux Avancés de Villeurbanne.

millions pour les membranes à cristal phononique, voir la figure 4) et la possibilité de les coupler à tous les effets et systèmes possibles et imaginables : cavités, atomes, centres NV, forces, accélérations, contraintes mécaniques, champs extérieurs... Au-delà du simple refroidissement dans l'état quantique fondamental, bientôt réalisé sur toutes sortes de systèmes, des propriétés purement quantiques sont mises en évidence : asymétrie des bandes latérales (liée aux propriétés des opérateurs $\hat{\alpha}$ et $\hat{\alpha}^\dagger$) [8], états comprimés du mouvement, intrication de deux résonateurs ou état chat de Schrödinger d'un résonateur mécanique [9]... avec des masses s'échelonnant sur près de 20 ordres de grandeur, des nanoparticules en silice piégées dans des pinces optiques ($m \sim 10^{-18}$ kg) aux miroirs suspendus d'Advanced LIGO ($m \sim 40$ kg). Facilement couplés au champ optique ou micro-ondes, éventuellement aux deux simultanément, les systèmes optomécaniques sont notamment envisagés comme mémoires quantiques ou pour effectuer la transduction entre ces deux domaines de fréquences, pour permettre la dissémination par fibre optique d'information quantique entre deux nœuds quantiques (placés dans des cryostats, dans lesquels fonctionnent les systèmes de qubits supraconducteurs).

CONCLUSION : VERS L'OPTOMÉCANIQUE QUANTIQUE

Parallèlement au développement des sources de lumière comprimée et à leur application aux interféromètres gravitationnels, les progrès considérables effectués récemment en micro- et nanofabrication ont permis l'émergence d'un nouveau domaine,

l'optomécanique, qui consiste à coupler des résonateurs mécaniques mésoscopiques à la lumière, dans le domaine optique ou microondes. Au-delà des applications à la métrologie (thermométrie, capteurs de pression, microscopie à force atomique...), l'accent peut être mis sur l'état quantique des champs (génération de lumière comprimée), sur celui du résonateur (états non-classiques) ou sur les deux (intrication entre la lumière et l'état quantique du résonateur). Ce domaine est très prometteur pour le traitement quantique de l'information ou pour l'étude des fondements de la mécanique quantique, par exemple la caractérisation d'états quantiques et de leur décohérence pour des résonateurs mécaniques macroscopiques [10].

REMERCIEMENTS

Les travaux résumés ici ont été menés en partie dans l'équipe Optomécanique et Mesures Quantiques du Laboratoire Kastler Brossel, en collaboration avec Antoine Heidmann, Michel Pinard, Tristan Briant, Samuel Deléglise et Thibaut Jacqmin. Ils ont également profité de nombreuses collaborations en France et à l'étranger, notamment avec plusieurs équipes de la Collaboration Virgo, le Laboratoire des Matériaux Avancés, l'équipe de Francesco Marin au LENS de Florence, l'équipe de Rémy Braive au Centre de Nanosciences et Nanotechnologies et celle d'Olivier Le Traon au Département de Mesures Physiques de l'ONERA. ●

RÉFÉRENCES

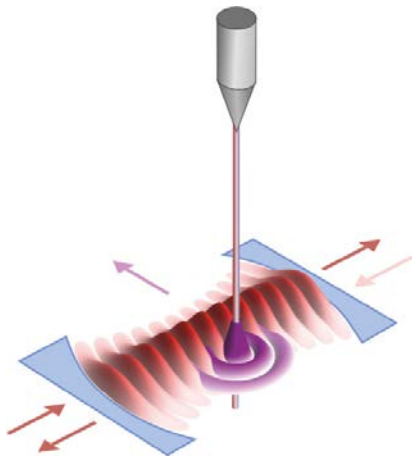
- [1] C. M. Caves, *Phys. Rev. Lett.* **45**, 75 (1980)
- [2] F. Acernese *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 231108 (2019)
- [3] M. Aspelyer, T. Kippenberg et F. Marquardt, *Rev. Mod. Phys.* **86**, 1391 (2014)
- [4] T. P. Purdy, R. W. Peterson et C. A. Regal, *Science* **339**, 801 (2013)
- [5] P.-F. Cohadon, M. Pinard et A. Heidmann, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 3174 (1999)
- [6] S. Gigan *et al.*, *Nature* **444**, 67 (2006). O. Arcizet *et al.*, *Nature* **444**, 71 (2006)
- [7] J. D. Teufel *et al.*, *Nature* **475**, 359 (2011)
- [8] A. H. Safavi-Naeini *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 033602 (2012)
- [9] M. Bild *et al.*, *Science* **380**, 274 (2023)
- [10] M. Croquette *et al.*, *AVS Quantum Sci.* **5**, 014403 (2023)

EXPLORER LA NANO-OPTOMÉCANIQUE AVEC DES NANOFILS SUSPENDUS

Michael CROQUETTE, Francesco FOGLIANO, Chao ZHANG, Cattleya DOUSSET, Lucas JUDÉAUX, Benjamin BESGA, Antoine REIGUE, Benjamin PIGEAU, Olivier ARCIZET*

Institut Néel, CNRS et Université Grenoble Alpes, 25 rue des martyrs 38000 Grenoble

*olivier.arcizet@neel.cnrs.fr



L'utilisation de nanorésonateurs mécaniques ultrasensibles de taille sub-longueur d'onde permet de cartographier la structure du champ électromagnétique à petite échelle grâce à la mesure des forces et des gradients de force qu'il génère. En mesurant optiquement les vibrations transverses de nanofils suspendus en carbure de silicium, il est possible d'établir le champ de force produit par un faisceau laser focalisé ou par un seul photon peuplant une microcavité, mais aussi par les champs électrostatiques à la surface de nanostructures métalliques.

<https://doi.org/10.1051/photon/202412742>

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.

DES SONDES DE FORCE VECTORIELLES ET ULTRASENSIBLES

Les nanofils employés sont en carbure de silicium (SiC), un semi-conducteur à grand gap présentant peu d'absorption dans le visible. D'une longueur typique de 100 μm , ils sont collés à l'extrémité d'une pointe métallique qui permet de les manipuler et de positionner finement leur extrémité vibrante, de diamètre sub-longueur d'onde (100-400 nm), dans le champ lumineux ou le champ de force à explorer. Leur indice de réfraction élevé (2.7) leur

permet d'héberger des résonances optiques internes, les résonances de Mie, qui structurent fortement l'interaction lumière-nanofil. Elles sont responsables des couleurs vives observées au microscope en lumière blanche, voir la figure 1, que nous exploitons pour déterminer leur diamètre. Selon les expériences envisagées, on peut souhaiter exacerber l'interaction lumière-nanofil – un nanofil rouge interagira fortement avec un laser He-Ne - ou au contraire opérer dans des régimes peu intrusifs, en utilisant de plus petits diamètres.

Suspendus à une extrémité, les nanofils vibrent transversalement à leur axe, et leurs propriétés mécaniques dépendent essentiellement de la géométrie : en ajustant leurs dimensions, nous avons été amenés à travailler avec des modes propres de vibration oscillant entre 1 kHz et 10 MHz. En travaillant sous vide afin de supprimer les pertes acoustiques induites par l'air, les facteurs de qualité obtenus atteignent alors typiquement 10000 à température ambiante, ce qui leur confère une sensibilité en force élevée, de quelques attonewton (10^{-18} N) en 1s d'intégration. De plus,

les nanofils se déforment de façon quasi identique selon les deux directions transverses, ce qui permet de mesurer non seulement la norme mais aussi l'orientation latérale des forces auxquelles ils sont soumis.

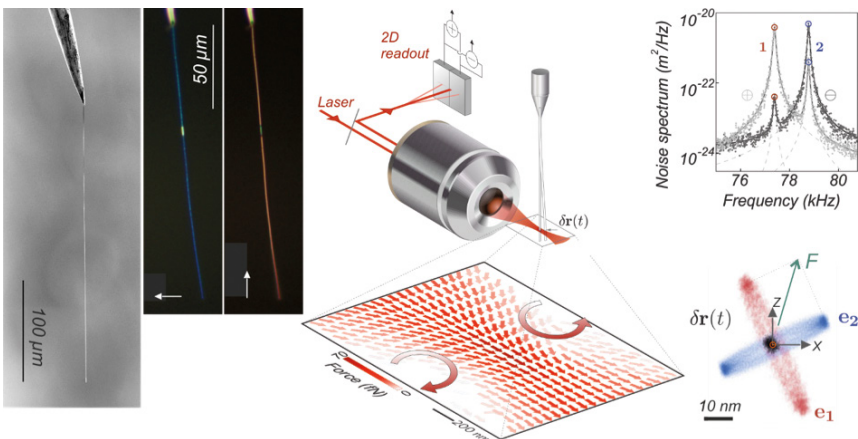
Pour mesurer les vibrations des nanofils, on a recours à des techniques de lecture optique. Un faisceau laser est focalisé grâce à un objectif de grande ouverture numérique sur l'extrémité vibrante du nanofil. En vibrant, ce dernier va moduler le champ diffusé et en particulier la fraction qui est collectée à travers l'objectif sur une photodiode à deux quadrants. En positionnant le nanofil un peu avant le waist optique et en mesurant la somme et la différence des deux photo-courants on peut alors mesurer ses vibrations parallèlement et perpendiculairement à l'axe optique du laser. Cette mesure bidimensionnelle permet alors de mesurer non seulement le bruit thermique du nanofil dans l'espace transverse, mais aussi sa réponse à une force externe, voir la Figure 1. Ces mesures permettent d'identifier les deux modes propres transverses fondamentaux des nanofils, quasi dégénérés (<1%), qui oscillent dans des directions perpendiculaires et de les exploiter afin

de mesurer des forces faibles, en bénéficiant d'une réponse mécanique accrue.

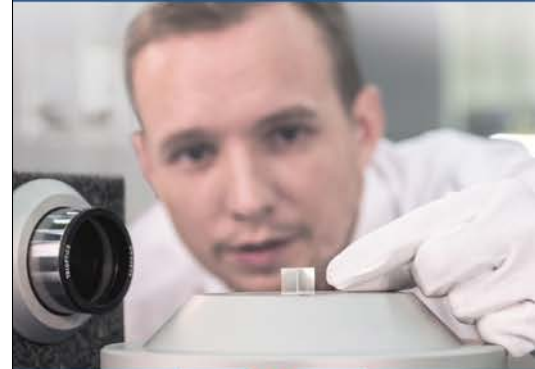
La connaissance des propriétés mécaniques du nanofil (les fréquences, l'amortissement et les directions de vibrations des deux modes fondamentaux, ainsi que leur profil de déformation) permet donc de déterminer la force subie par le nanofil à partir de la mesure des déformations induites. Cette mesure est particulièrement efficace et précise lorsqu'il est possible de moduler temporellement la force à étudier aux fréquences de vibrations du nanofil car on mesure alors directement la projection de cette force dans la direction des modes propres. Ce contrôle temporel est réalisable lorsqu'on étudie des forces optiques ou électrostatiques, en modulant simplement l'intensité des lasers ou des tensions d'échantillon, mais ce n'est pas toujours le cas, en particulier lorsqu'on étudie les forces de proximité, de type Van der Waals ou Casimir qui apparaissent à la surface de nanostructures.

Dans ce cas, à défaut de mesurer directement les forces, on va néanmoins pouvoir mesurer les gradients spatiaux de ces champs de force, en mesurant leur impact sur les propriétés ●●●

Figure 1. Gauche: images de nanofils obtenues aux microscopes électronique et optique en lumière blanche. Centre : les vibrations du nanofil sont mesurées optiquement, grâce à un objectif de grande ouverture numérique. Droite : spectre de bruit du nanofil révélant ses deux modes propres transverses de vibration dont les directions propres peuvent être déterminées en modulant une force externe à la résonance de chacun des modes. En noir, le bruit thermique du fil en l'absence d'excitation. Carte de la force optique produite au sein du waist par un faisceau de 100 μ W.



Instrumentation de test optique



Mesure de la plupart des paramètres optiques

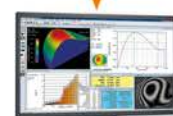
FTM, EFL, BFL, centrage, alignement front d'onde

Applications en R&D et production



Banc de FTM
UV, VIS, IR

Interféromètre "μPhase"



Station de centrage optique

TRIOPTICS France

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

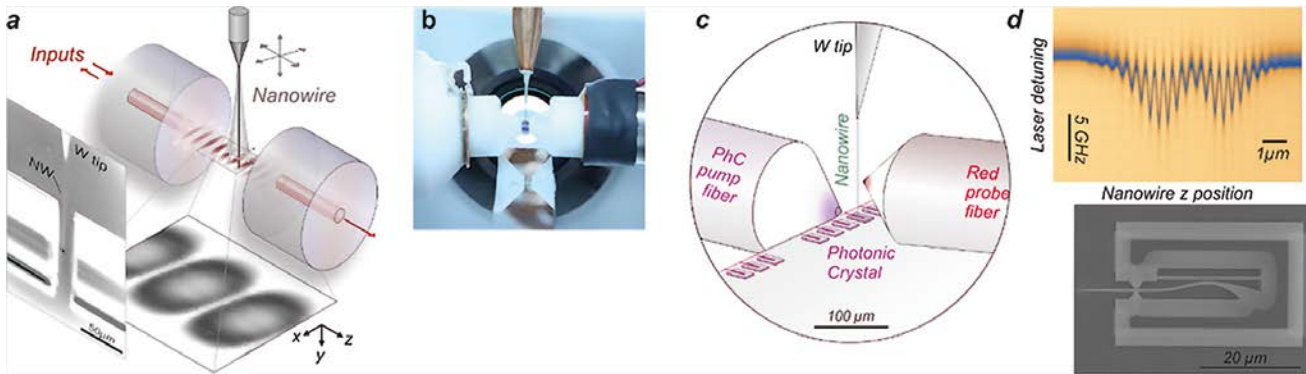


Figure 2. Principe des expériences de nano-optomécanique en cavité. L'extrémité vibrante des nanofils est insérée dans le champ intracavité d'une microcavité fibrée (a,b) et d'un cristal photonique (c,d). Le mode de cavité est perturbé par le nanofil, et en retour le nanofil subit la force optomécanique induite par le mode de cavité. Sa très grande sensibilité en force permet de détecter et de cartographier l'action optomécanique d'une population moyenne proche d'un seul photon.

mécaniques du nanofil. Cette approche représente une transposition à deux dimensions du principe de mesure des microscopes à force atomique en mode non-contact : la mesure des variations de fréquence d'un cantilever oscillant à la surface d'un échantillon, induites par les gradients verticaux de la force normale, permet de déterminer sa topographie. Le nanofil vibrant latéralement, il évolue quant à lui dans un champ de force bidimensionnel (F_x, F_z dans la base (x, z) transverse), et va être potentiellement sensible aux 4 composantes des gradients de force ($\partial_x F_x, \partial_z F_x, \partial_x F_z, \partial_z F_z$), qui vont modifier à la fois les fréquences mais aussi les directions des deux modes propres. On peut montrer que la mesure de ces perturbations mécaniques permet de remonter de façon univoque aux gradients de force locaux générant ces perturbations.

Nous avons validé ce principe de mesure d'abord dans le cas d'une force électrostatique produite par une nano-pointe métallique approchée au voisinage du nanofil. D'abord en analysant la structure spectro-angulaire de son bruit thermique [1], puis en développant des protocoles de mesure plus évolués, permettant d'atteindre un rythme de mesure en

quasi temps réel. Cela nous a permis de nous approcher plus finement de nanostructures métalliques et d'étudier en particulier les forces électrostatiques et de proximité à leur surface.

NANO-OPTOMÉCANIQUE DANS UN FAISCEAU FOCALISÉ

Étant extrêmement sensible, la dynamique du nanofil peut également être impactée par le faisceau laser qui sert à mesurer ses vibrations. Il est donc nécessaire de caractériser en détail cette interaction pour pouvoir la dissocier des forces que l'on cherche à mesurer. Nous avons d'abord cartographié le champ de force produit par un faisceau laser focalisé, grâce à la mise en œuvre de techniques de mesure pompe-sonde [2]. Il est reproduit sur la figure 1, où l'on reconnaît une structure de type pression de radiation avec un champ de force convergent puis divergent en amont et en aval du waist, et une force maximale de quelques 100 fN pour 100 μ W de puissance. Cette structure révèle également la nature non-conservative du champ de force, avec des zones à rotationnel non nul de chaque côté du waist optique. Un tel champ de force, qui ne dérive pas d'une énergie potentielle

comme on s'y attend pour les forces de pression de radiation, perturbe fortement la dynamique du nanofil : lorsqu'on le positionne sur le bord du waist, on observe une brisure de l'orthogonalité des modes propres et une convergence progressive des modes, dont les fréquences et les directions de vibrations convergent vers une valeur commune, conduisant à plus forte puissance à une instabilité dynamique : le nanofil se mettant alors à « tourner » dans le sens du rotationnel du champ de force [2].

NANO-OPTOMÉCANIQUE EN CAVITÉ À FAIBLE NOMBRE DE PHOTON

Les nanofils permettent donc d'obtenir des informations assez fines sur la structure des champs lumineux. Il était donc assez naturel de chercher à travailler avec des modes optiques stationnaires, confinés dans des microcavités de grande finesse et à petit volume de mode, afin d'exacerber le champ électromagnétique par photon intracavité et donc l'intensité du couplage. On a ainsi exploré le couplage optomécanique entre les vibrations des nanofils et le champ lumineux de microcavités fibrées produites au Laboratoire Kastler Brossel [3], et de cavités à cristaux photoniques produites au Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, dans les groupes de Jakob Reichel et Rémy Braive, voir la figure 2.

Lorsque l'extrémité vibrante du nanofil est positionnée à un ventre

de l'onde stationnaire du mode de cavité, il modifie le chemin optique de la cavité, ce qui induit un décalage paramétrique de la fréquence de résonance optique et accroît sa largeur spectrale car les nanofils diffusent fortement les photons vers l'extérieur. On parle de couplage optomécanique dispersif et dissipatif. Au contraire, la perturbation induite sera minimale si le nanofil est positionné à un nœud de l'onde stationnaire. On peut ainsi cartographier la structure spatiale et les propriétés du champ intracavité grâce au nanofil, avec une précision sub-longueur d'onde, voir la figure 2. Ces mesures en balayage, permettent de localiser et mesurer la structure de l'onde stationnaire, que ce soit entre les deux miroirs de la microcavité fibrée, ou à la surface du cristal photonique, dans la partie évanescence du mode. On peut en déduire l'intensité du couplage optomécanique (qui peut atteindre plusieurs GHz/nm), et vérifier que ces dispositifs permettent d'atteindre largement le régime de couplage ultrafort, lorsqu'un seul photon dans la cavité est capable de déplacer le nanofil de plus que ses fluctuations quantiques de

point zéro, le plus petit déplacement observable pour un oscillateur ultrafroid.

Ainsi, après avoir mesuré l'impact du nanofil sur le mode optique, on a cherché à mesurer l'autre facette du couplage optomécanique, c'est-à-dire de cartographier la force exercée par le mode optique sur le nanofil. Pour cela nous mesurons les déformations du nanofil induites par une modulation de l'intensité du champ intracavité, grâce à un laser sonde indépendant. Les nanofils de petit diamètre sont généralement attirés vers les zones de fort champ lumineux, les ventres du mode de cavité, mais ceci peut s'inverser pour les nanofils plus gros, lorsque les résonances de Mie entrent en jeu.

La très grande sensibilité des nanofils a permis de mesurer la force produite par une modulation de la population moyenne du mode de cavité inférieure à un photon, avec une sensibilité atteignant 300 aN/photon dans les zones de forte interaction, sur les bords des ventres de l'onde stationnaire. Le champ de force optomécaniques est ainsi fortement structuré à l'échelle de la longueur d'onde et on a pu vérifier que ses gradients

de force, pourtant produits par un nombre de photons proche de l'unité, étaient largement décelables par les nanofils (générant des variations de fréquence de 100 Hz pour un fil vibrant à 10 kHz) [3]. De telles mesures démontrent donc la capacité des nanofils à explorer le couplage optomécanique et imager la répartition spatiale du champ intracavité, pour des occupations moyennes de l'ordre de 1 photon.

Ces travaux ouvrent donc la voie à l'optomécanique en cavité opérant à très faible nombre de photon, un régime encore quasiment inexploré à l'opposé des expériences traditionnelles dans le domaine, dans lesquelles il était nécessaire de fortement pomper les cavités pour palier à la faiblesse de l'interaction produite par un seul photon. Ce régime dans lequel les non-linéarités se développent à l'échelle de quelques photons seulement, présente un fort intérêt fondamental, pour l'optique et l'optomécanique quantique.

UNE SONDE DE FORCE UNIVERSELLE

Les nanofils sont donc particulièrement adaptés à l'étude des champs électromagnétiques ●●●



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



Hi-Tech Detection Systems

LED UV

**LED / MODULES LED
VERSION STANDARD ET CUSTOM
POUR PETITES À GRANDES SÉRIES**

- De 237 à 405 nm
- Large choix de puissances et d'angles
- Boîtiers CMS ou traversants

*Large gamme de **Photodiodes UV** également disponible*

APPLICATIONS

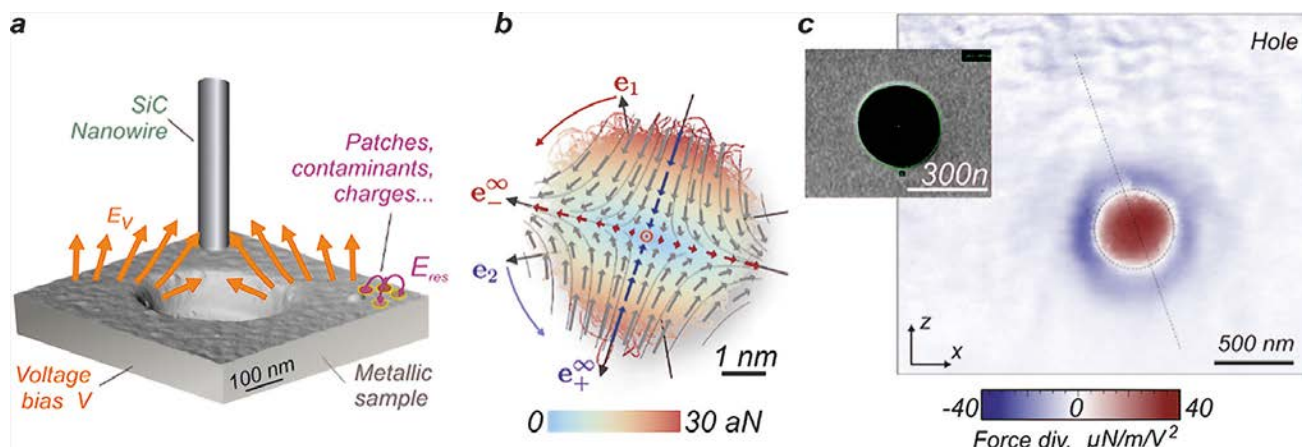
Décontamination - Stérilisation surfaces, fluides et air -
Analyse de gaz - Spectroscopie - Curing - Fluorescence -
Effets spéciaux - Forensic - Détection de contrefaçon...

Suivez nous !






www.htds.fr
info@htds.fr



à l'échelle nanométrique, mais pas uniquement. On les emploie également pour imager les champs électrostatiques à la surface de nanostructures métalliques, ce qui nous renseigne sur la topographie des structures et les imperfections de surface (patches électrostatiques, joints de grains, contaminants...), voir la Figure 3. Ces mesures permettent également d'établir des protocoles permettant d'annuler le champ électrostatique ressenti par le nanofil grâce à l'emploi d'électrodes externes. L'objectif est alors de mesurer quantitativement et de cartographier les forces résiduelles présentes dans le vide, les forces de Casimir causées par les fluctuations quantiques du champ électromagnétique, dans des géométries nouvelles.

Les expériences précédentes ont été conduites à température ambiante. Refroidir les nanofils permet d'abord d'accroître encore leur sensibilité en force, grâce à la réduction de leur agitation thermique et des sources de dissipation mécanique, mais aussi d'explorer de nouvelles thématiques, en particulier dans le monde de la matière condensée où beaucoup de phénomènes ne se manifestent qu'à froid. Cependant, la thermalisation des nanofils est très délicate, car ils conduisent très mal la chaleur à cause de leur rapport d'aspect gigantesque (>1000) qui évacue difficilement la chaleur déposée par le laser de lecture et à

Figure 3. a: Mesure des champs de force électrostatique au-dessus d'une nanostructure métallique. En variant le potentiel on peut discriminer les effets de la topographie de l'échantillon des imperfections de surface. b : Les protocoles de mesure permettent en chaque position d'établir une mesure du gradient de force que ressent le nanofil, tracé ici sur l'étendue de son bruit thermique. c: Cartographie de la divergence du champ de force électrostatique mesurée à 100 nm au-dessus d'un trou percé dans un plan métallique d'or. La divergence mesurée est répulsive, le nanofil étant attiré vers les bords du trou, et on devine la contribution résiduelle des joints de grains.

la réduction dramatique des conductances thermique à très basse température. Grâce au développement de techniques de mesure opérant dans le régime de comptage de photon ainsi que d'objectifs interférométriques fonctionnant à très basse température et de suspensions mécaniques dédiées, on a pu s'affranchir suffisamment du chauffage optique et des sources de bruit parasite, pour observer dans un cryostat à dilution un nanofil thermalisé à 32mK [4]. La sensibilité en force atteinte est alors gigantesque, de quelques 10 zN (10^{-20} N)

en 1 s, suffisante en principe pour mesurer la force de Coulomb entre deux électrons séparés de $100\mu\text{m}$, ou encore de mesurer le retournement d'un spin électronique unique dans un gradient de champ magnétique de 1000 T/m [5].

Ainsi, l'utilisation de nano-résonateurs mécaniques ultrasensibles devrait permettre d'apporter un regard nouveau dans l'étude des interactions fondamentales, en particulier grâce à la détection des forces qu'elles génèrent, à l'échelle du photon ou du spin uniques, ou des fluctuations quantiques du vide. ●

RÉFÉRENCES

- [1] L. Mercier de Lépinay, B. Pigeau, B. Besga, P. Vincent, P. Poncharal and O. Arcizet, *Nat. Nanotechnol.* **12**, 156 (2017).
- [2] A. Gloppe, P. Verlot, E. Dupont-Ferrier, A. Siria, P. Poncharal, G. Bachelier, P. Vincent and O. Arcizet, *Nat. Nanotechnol.* **9**, 920 (2014).
- [3] F. Fogliano, B. Besga, A. Reigue *et al.*, *Phys. Rev. X* **11**, 021009 (2021)
- [4] F. Fogliano, B. Besga, A. Reigue *et al.*, *Nat. Commun.* **12**, 4124 (2021)
- [5] O. Arcizet, V. Jacques, A. Siria *et al.*, *Nat. Phys.* **7**, 879 (2011)

NANO-OSCILLATEUR ÉLECTRO-OPTOMÉCANIQUE À BOUCLE FERMÉE POUR LA PHOTONIQUE MICRO-ONDE INTÉGRÉE

Inès GHORBEL¹, Alfredo DE ROSSI¹, Sylvain COMBRIE¹, Rémy BRAIVE^{2,3,4,*}

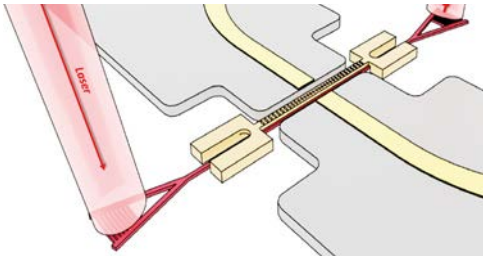
¹Thales Research and Technology, Campus Polytechnique, Palaiseau, France

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

³Université Paris Cité, Paris, France

⁴Institut Universitaire de France (IUF)

* remy.braive@universite-paris-saclay.fr



La forte interaction optomécanique au sein d'une nanostructure intégrée sur un circuit photonique permet la génération d'oscillation directement aux fréquences GHz sur une porteuse optique. L'ajout d'une boucle de rétroaction opto-électro-mécanique renforce la stabilité court terme de l'oscillateur.

<https://doi.org/10.1051/photon/202412947>

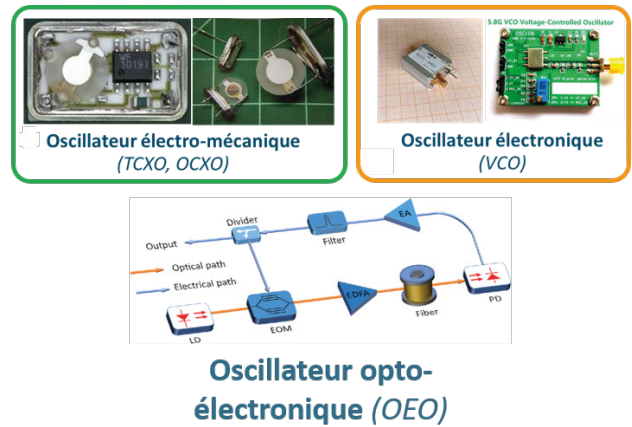
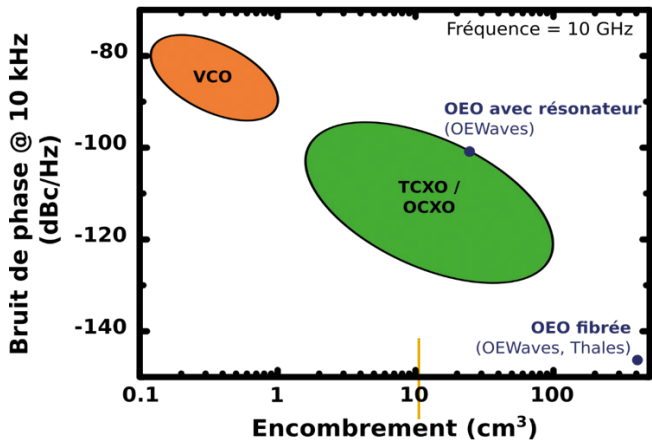
Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation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

L'optomécanique ou autrement dit l'interaction réciproque entre la lumière et le mouvement mécanique d'un objet, est un domaine de recherche dont les origines se trouvent au cœur de la mécanique quantique. L'image d'un objet mobile interagissant avec la lumière via la pression de radiation a été proposée très tôt comme support théorique pour illustrer certaines

des prédictions quantiques emblématiques. Formalisées au milieu des années 1970 dans le contexte de l'interférométrie à ondes gravitationnelles, les développements de la mesure continue de la position jusqu'aux limites fondamentales sont une contribution essentielle à la théorie de la mesure quantique (voir article p.38). Au cours de cette période, l'impact de la pression de radiation a été observé dans une grande diversité de systèmes, allant des interféromètres

à ondes gravitationnelles à l'échelle du kilomètre aux micro-résonateurs couplés à des cavités optiques de conceptions, de tailles, de matériaux et de géométries variés. De manière remarquable, tous ces systèmes peuvent être décrits par les mêmes principes sous-jacents [1].

Depuis son origine, les développements scientifiques et technologique liés à l'optomécanique se sont principalement concentrés sur l'observation d'effets quantiques à ●●●



l'échelle mésoscopique. Néanmoins, dans le domaine classique, l'une des contributions notables de ce domaine est la manifestation d'une instabilité paramétrique, qui entraîne une amplification mécanique et donc une oscillation auto-entretenu du mode mécanique pilotée de manière purement optique [2]. Aujourd'hui, les oscillateurs, dispositifs permettant la mesure précise du temps ou la génération de référence de fréquence, sont principalement des quartz ou des générateurs électroniques avec des domaines d'application vastes et particulièrement impactants dans notre société moderne : les communications sans fil, l'électronique numérique à grande vitesse, les radars, les systèmes de chronométrage et la navigation moderne. Néanmoins, un des défis dans ce domaine réside dans la génération directe de signaux micro-ondes à haute fréquence dans le domaine des GHz et au-delà tout en conservant un bruit de phase ultra-faible ou autrement dit une stabilité importante. Dans ce cadre, l'optomécanique à l'échelle nanométrique peut permettre de répondre

Figure 1. Représentation de l'état de l'art des oscillateurs en fonction de l'encombrement et le bruit de phase à 10 kHz de la porteuse normalisé à une fréquence de 10 GHz avec en vert les oscillateurs à quartz, en orange les oscillateurs électronique type VCO et en bleu les oscillateurs opto-électroniques (OEO).

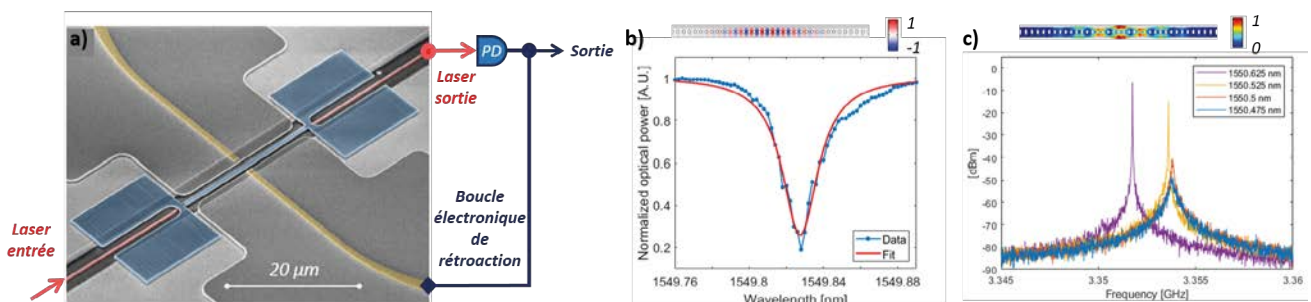
à ce défi et proposer une nouvelle technologie d'oscillateurs compacts pouvant à terme s'approcher des performances de l'état de l'art des oscillateurs électroniques et hybrides.

PERFORMANCE ET STABILITÉ DES OSCILLATEURS

De manière générale, la stabilité d'un oscillateur, que ce soit en phase ou en amplitude, est un facteur de mérite essentiel. Les oscillateurs dans leurs utilisations quotidiennes sont tous soumis à un bruit qui peut prendre différentes formes. Lorsque ce bruit est superposé au signal périodique de sortie de l'oscillateur, il induit une

variation aléatoire des signaux de sortie en amplitude et/ou en fréquence, ce qui limite la précision et l'exactitude des mesures temps-fréquence effectuées par l'oscillateur. En général, le bruit d'amplitude peut être supprimé par différentes techniques (ex : compression du gain...). Le bruit de phase quant à lui peut être divisé en deux typologies principales : le bruit additif et le bruit multiplicatif. Le premier comprend le bruit thermique et le bruit de grenaille, pour n'en citer que quelques-uns. Par contre, la contribution principale au second type de bruit provient des bruits ambiants tels que les fluctuations de

Figure 2. (a) Image MEB (image du haut) du cristal optomécanique (bleu) au-dessus d'un guide d'onde silicium (rouge) avec les électrodes (jaune) au cœur d'une boucle de rétroaction optoélectronique de rétroaction ; (b) Transmission optique avec le profil du champ électromagnétique du mode optique confiné ; (c) Résonance mécanique pour différentes longueurs d'onde avec le profil du déplacement.



température ou l'alimentation électrique. Ainsi, la génération d'un signal de haute pureté nécessite de mettre en œuvre des stratégies appropriées pour éliminer le bruit d'amplitude et réduire autant que possible le bruit de phase.

OSCILLATEURS ÉLECTRONIQUES ET HYBRIDES : ÉTAT DE L'ART

Traditionnellement, les oscillateurs à quartz et leurs versions apparentées telles que TCXO (oscillateur à cristal contrôlé par la température) ou OCXO (oscillateur à cristal contrôlé par un four) offrent aujourd'hui une combinaison inégalée de compacité et de pureté spectrale (Figure 1). Néanmoins, ils oscillent à des fréquences inférieures à quelques centaines de MHz. D'autres types d'oscillateurs (tels que les oscillateurs à résonateur diélectrique et les oscillateurs à saphir) produisent directement des signaux à haute fréquence reposant essentiellement sur des dispositifs résonants qui se caractérisent par des temps de stockage importants. Toutefois, les meilleurs résonateurs diélectriques présentent un facteur Q limité à haute fréquence, tandis que les oscillateurs en saphir sont encombrants et complexes. Les oscillateurs micro-ondes optoélectroniques (OEO) constituent une alternative prometteuse [3].

En ce qui concerne les oscillateurs à quartz et apparentés, pour un fonctionnement à des fréquences plus élevées, leurs fréquences doivent être multipliées au prix d'une augmentation du bruit de l'oscillateur. À l'inverse, les OEO permettent de générer directement des signaux micro-ondes à haute fréquence et ont déjà démontré de très hautes performances en termes de pureté spectrale (typiquement -145 dBc/Hz à 10 kHz de décalage pour une oscillation à 10 GHz) compatibles avec des applications telles que les radars. Cette pureté du signal micro-onde dans les OEO est obtenue grâce à une ligne à retard optique (généralement une fibre optique) insérée dans une boucle de rétroaction. Le facteur Q de l'oscillateur est alors donné par L/λ_{RF} , L représentant la longueur de la fibre et λ_{RF} la longueur d'onde du signal RF. Des facteurs Q de l'ordre de 105

sont nécessaires pour obtenir une pureté spectrale élevée. Cela impose l'utilisation de fibres de quelques centaines de mètres voire quelques km de long. Ces lignes à retard sont cependant sensibles à l'environnement (vibrations, température...) dégradant le bruit de l'oscillateur proche de la porteuse. En outre, l'architecture OEO se traduit par des dispositifs encombrants (typiquement quelques litres), empêchant leur intégration dans des systèmes embarqués (Figure 1).

Le défi réside donc dans la mise en œuvre d'oscillateurs miniaturisés, compacts, transportables et intégrés, en particulier pour les applications embarquées et le traitement du signal sur puce. Ce haut niveau de miniaturisation est important non seulement du point de vue de la compacité, mais aussi pour une meilleure insensibilité à l'environnement et également en termes de consommation énergétique. Dans ce cadre, la réalisation d'une synthèse de fréquence à haute pureté spectrale pour les applications micro-ondes, directement à la fréquence d'intérêt dans le domaine des GHz et dans un dispositif miniaturisé sur puce reste un défi dans le domaine de la photonique micro-onde.

CRISTAUX OPTOMÉCANIQUES

Les avancées récentes dans le domaine de l'optomécanique se sont en partie appuyées sur les techniques de nanofabrication afin d'approfondir, contrôler et renforcer les interactions photon-phonon au sein d'une structure nanométrique. La réduction de la taille du résonateur optomécanique à l'échelle nanométrique permet entre autres d'obtenir des modes à hautes fréquences (MHz - GHz) et nécessite des puissances optiques plus faibles. Les diverses implémentations à l'échelle nanométrique de l'optomécanique s'inspirent principalement des plateformes nanophotoniques largement explorées telles que les micro-disques, résonateurs en anneaux et les membranes à cristal photonique.

Ces dernières sont connues depuis plusieurs dizaines d'années pour offrir un fort confinement de la lumière dans des volumes limités par la diffraction grâce à une bande interdite photonique. ●●●



par **OPTON LASER**
INTERNATIONAL

OPTO-MÉCANIQUE & MICRO-POSITIONNEMENT



- ▲ Tables Optiques & Breadboards à façon
- ▲ Large gamme de platines manuelles & motorisés compatibles vide
- ▲ Montures Optiques jusqu'à 6 "
- ▲ Grande capacité de customisation
- ▲ Carte de contrôle OEM & super versatile



www.optonlaser.com

Plus récemment, la mise en place simultanée d'une bande interdite acoustique et photonique a permis de mettre en évidence un confinement acoustique au sein de ces nanostructures. De par leurs géométries, elles sont le siège de modes de vibration oscillant directement aux fréquences GHz. Le couplage entre les degrés de liberté optique et acoustique ou couplage optomécanique est fortement renforcé dans ces résonateurs nanométriques du fait de la co-localisation dans le même volume des résonances photoniques et acoustiques.

Ces structures également appelées cristaux optomécaniques constituent donc une plate-forme de choix pour l'utilisation du couplage photon-phonon, en permettant une interaction optomécanique améliorée dans le domaine des GHz. Cette interaction quantifiée par le taux de couplage optomécanique dans le vide g_0 , décalage de fréquence optique induit par les fluctuations du point zéro du mode mécanique, dépasse les 100 kHz dans les cristaux optomécaniques.

En tirant parti de la fréquence élevée des modes mécaniques au sein des cristaux optomécaniques, de la transduction optique et du contrôle de la fréquence mécanique, il a été possible, au cours de la dernière décennie, de réaliser de nombreuses démonstrations que ce soit dans le régime quantique ou classique. Le développement de ces nouveaux systèmes optomécaniques a permis d'atteindre le régime où les effets de pression de radiation deviennent dominants, avec des réalisations telles que le refroidissement à l'état fondamental d'un résonateur mécanique, la transduction de qubit sur un photon ou encore la métrologie de la température. Dans le même temps, la capacité de ces mêmes systèmes optomécaniques à obtenir une oscillation auto-entretenu sans besoin de rétroaction électronique ouvre de nouvelles opportunités et des concepts innovants pour des capteurs ultra-compacts ou des oscillateurs micro-ondes stables.

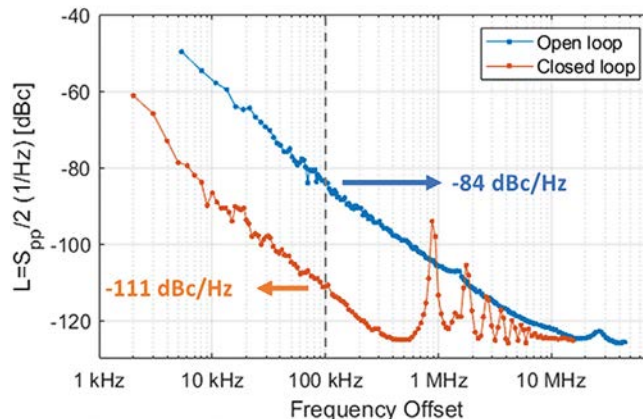


Figure 3. Mesure de bruit de phase sans (bleu) et avec (orange) la boucle de rétroaction.

OSCILLATEURS OPTOMÉCANIQUES MICRO-ONDES

L'architecture la plus simple pour un oscillateur à micro-ondes exploitant l'interaction optomécanique est un résonateur optomécanique (Figure 2a) à commande optique présentant des oscillations régénératives dans le GHz. Grâce à la résonance optique aux longueurs d'onde télécom (~1550 nm) – Figure 2b, l'énergie du laser est alors convertie en un signal micro-ondes sans aucune boucle de rétroaction. En exploitant l'interaction photon-phonon améliorée dans un cristal optomécanique de haute qualité oscillant directement dans le domaine des GHz (Figure 2c), ces derniers répondent déjà à l'une des exigences du domaine.

Cependant, bien qu'une telle architecture offre une simplicité inégalée et de petits facteurs de forme, s'appuyer uniquement sur les oscillations régénératives dans les résonateurs optomécaniques ne permet pas d'obtenir une pureté spectrale suffisante, en raison des fluctuations induites par l'environnement, du bruit thermo-mécanique, du bruit de grenaille.... La réduction de ces fluctuations nécessite l'intégration de plusieurs composants clés : (i) un circuit optique pour lire et « alimenter » l'oscillation mécanique ainsi (ii) qu'une excitation résonante efficace pour contrôler le mode mécanique dans la gamme des GHz (Figure 2a). L'objectif n'est pas seulement l'utilisation de

l'interaction optomécanique pour la génération de fréquences ultrastables, mais aussi la mise en place de stratégies de verrouillage et de rétroaction qui exploitent pleinement l'intégration sur puce des moyens de contrôle électrique et/ou acoustique.

Préalablement à l'obtention de performances de pointe en termes de bruit de phase, la mise en œuvre de techniques de stabilisation de la fréquence optomécanique est indispensable. Parmi les diverses techniques, le verrouillage par injection ou « injection locking » est l'une des plus répandues. Différentes architectures peuvent être mises en œuvre afin de réaliser ce verrouillage. Dans le cas présent [4], l'excitation résonante directe du mode mécanique au sein du cristal optomécanique a été choisie en tirant parti des propriétés piézoélectriques du matériau utilisé, à savoir le Phosphore de Gallium (GaP). Cela permet ainsi d'obtenir un actionnement électromécanique intégré sur puce. L'optimisation de cette excitation nécessite de placer la structure optomécanique au centre de deux électrodes métalliques, tout en minimisant l'impact de leur présence sur le champ optique. L'application d'un signal électrique à la fréquence mécanique, tout en couplant le laser à proximité de la résonance optique, permet d'observer l'actionnement électromécanique transduit dans le domaine optique. En fonction des désaccords spectraux (optique et électro-mécanique) ainsi que de l'intensité du laser et l'amplitude

de l'excitation électrique, une large zone d'« injection locking » est atteignable.

A partir de là, il est donc possible de construire une boucle de rétroaction électro-opto-mécanique afin de réinjecter dans la cavité optomécanique le signal d'oscillation retardé, comme nous l'avons réalisé dans [4] (Figure 2a). Dans [4], la boucle est constituée de 210 mètres de fibre optique, ce qui fournit le délai nécessaire à une stabilisation optimale. L'intensité de la rétroaction est contrôlée par l'amplitude du signal RF envoyé directement aux électrodes à proximité de l'oscillateur optomécanique. Le bruit de phase minimal mesuré avec la boucle de rétroaction atteint une valeur typique de l'ordre de -111 dBc/Hz à 100 kHz de la porteuse (Figure 3), soit une largeur de raie de 0,7 Hz. Il s'agit d'une réduction drastique du bruit de phase par rapport à une architecture en boucle ouverte où un bruit de phase de -82 dBc/Hz (largeur de raie de 895 Hz) est mesuré au même décalage par rapport à la porteuse. L'utilisation d'une longueur de fibre de près de 210 m induit inévitablement des pics parasites à partir d'un décalage de 917 kHz, correspondant à l'intervalle spectral libre de la boucle. Cette dernière agit comme une cavité à Q élevé à cette fréquence de résonance spécifique. Une longueur de fibre plus courte réduirait les améliorations apportées par la stabilisation. A l'inverse, une fibre plus longue introduirait des pics parasites à une fréquence plus basse, augmentant ainsi le bruit proche porteuse. Par conséquent, le choix de la longueur de la fibre est un compromis entre ces deux considérations.

Il est important de noter que ces développements éliminent la nécessité d'un modulateur électro-optique externe encombrant sur le chemin optique pour

l'actionnement de la cavité, ce qui évite la conversion électrique-optique. Nous avons ainsi démontré une diminution de près de 30 dB sans perte optique supplémentaire. Il s'agit d'une étape importante vers des oscillateurs optomécaniques entièrement intégrés et un système plus compact.

LES DÉFIS À VENIR ET VISION

Néanmoins, pour atteindre les performances des OEO avec des oscillateurs optomécaniques, il est nécessaire d'améliorer l'efficacité de la transduction électromécanique ainsi que de réduire l'impact et les perturbations de l'environnement sur l'oscillateur lui-même. Afin d'obtenir un oscillateur optomécanique à très faible bruit de phase, ces exigences doivent également s'accompagner de l'intégration de la boucle de rétroaction sur puce. Des développements sont en cours pour la mise en place de délai optique et/ou acoustique suffisants pour une grande pureté spectrale. Alors, la stabilisation pourrait être obtenue en mettant en œuvre des boucles optoélectroniques compatibles avec l'intégration sur puce, exploitant un contrôle optique ou externe du mouvement mécanique. Cette intégration complète sur une unique puce reste actuellement un défi.

Au-delà de l'oscillateur optomécanique stable, l'architecture développée, l'intégration hybride de la plate-forme optomécanique sur le circuit optique SOI avec un contrôle résonnant électrique efficace, doit permettre d'ouvrir la voie à des fonctionnalités optiques plus avancées et cascadées pour le traitement du signal (y compris des détecteurs optiques, des éléments de multiplexage... sur la même puce), l'informatique à réservoir photonique voire même le développement de machines d'Ising cohérentes. ●

RÉFÉRENCES

- [1] M. Aspelmeyer, T. J. Kippenberg, and F. Marquardt, *Rev. Mod. Phys.* **86**, 1391 (2014)
- [2] Michael Metcalfe, *Appl. Phys. Rev.* **1**, 031105 (2014)
- [3] T. Hao, Y. Liu, J. Tang *et al.*, *Adv. Photonics* **2**, 1 (2020).
- [4] R. Horváth, G. Modica, I. Ghorbel *et al.*, *ACS Photonics* **10**, 2540–2548 (2023)



HASO LP

Large pupil
wavefront
sensor

Optical
characterization

Laser testing

Focus distance
adjustment

Direct sensing
without relay optics



www.imagine-optic.com

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

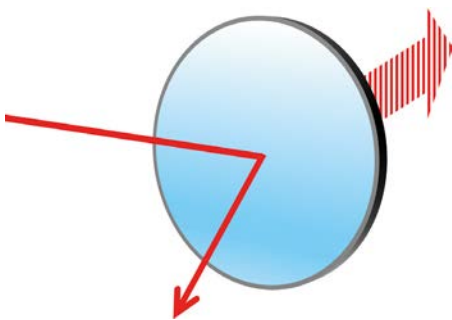
imagine  optic

COMPRENDRE LES FORCES OPTIQUES

Cyriaque GENET*

Institut de Science et d'Ingénierie Supramoléculaires (ISIS) - Université de Strasbourg et CNRS France

*genet@unistra.fr



La lumière exerce une action mécanique sur tout objet éclairé par échange d'impulsion entre le champ électromagnétique et la matière. De faible amplitude, les forces optiques ont pourtant donné lieu à des applications importantes. Les liens qu'elles entretiennent à la fois avec le champ et l'objet continuent d'être interrogés à l'heure actuelle.

<https://doi.org/10.1051/phys/202312952>

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'il publie en 1873 son « Traité sur l'électricité et le magnétisme », James C. Maxwell a achevé d'unifier les phénomènes électriques et magnétiques et propose une théorie électromagnétique de la lumière. Ce faisant, il érige l'un des piliers sur lequel va s'édifier la physique telle que nous la connaissons aujourd'hui [1]. Dépassant le cadre de la physique newtonienne, cette nouvelle théorie donne des prédictions expérimentales précises qui ouvrent chacune des champs d'explorations immenses.

L'une de ces prédictions est celle d'une action mécanique de la lumière. Comme l'écrit Maxwell dans son traité (au § 793) : « De tels rayons [lumineux] tombant sur un disque métallique fin, délicatement suspendu

dans le vide, pourraient induire un effet mécanique mesurable ».

PRESSION DE RADIATION

Avec des notations modernes, Maxwell définit pour une onde plane se propageant dans le vide à la vitesse de la lumière sa densité d'impulsion $p = u/c$ à partir de sa densité d'énergie $u = \frac{\epsilon_0}{2} |\mathcal{E}|^2 + 1/(2\mu_0) |\mathcal{H}|^2$ où ϵ_0 et μ_0 sont respectivement la permittivité et la perméabilité du vide et $(\mathcal{E}, \mathcal{H})$ le champ électromagnétique de l'onde. Par conservation d'impulsion, on calcule qu'une telle onde éclairant sous incidence normale une plaque de surface réfléchissante (coefficient de réflexion η) et absorbante (coefficient d'absorption α) va exercer une force

$$F = \epsilon_0 |\mathcal{E}|^2 S(2R + \alpha) \quad (1)$$

poussant la plaque dans la direction de propagation (Fig. 1). Comme Maxwell, on peut estimer pour une

densité d'énergie du rayonnement solaire de $u = 4,51 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$ une force de pression de radiation de quelques centaines de pico-Newtons exercée sur une surface de l'ordre du cm^2 .

Cette valeur, certes faible mais non négligeable, encourage P.N. Lebedev à effectuer en 1901 le premier test expérimental de la prédiction de Maxwell [2]. L'expérience de Lebedev consiste à utiliser un pendule de torsion aux bras duquel sont fixés les « *disque(s) métallique(s) fin(s), délicatement suspendu(s) dans le vide* » que Maxwell a décrit. La maîtrise expérimentale de Lebedev lui permet d'atteindre une sensibilité de mesure de 10^{-11} N sous vide (0.1 mbar) et de mesurer la pression de radiation (1) avec une précision de l'ordre de 20 %.

La relation (1) souligne le lien entre force optique et diffusion. Si l'on remplace le miroir plan de la Fig. 1 par une sphère, la force de pression

induite par une onde plane dans la direction \hat{z} de propagation est la résultante de deux contributions : l'impulsion « retirée » au faisceau par la section efficace d'extinction de la sphère $\sigma_{ext} = \sigma_{scat} + \sigma_{abs}$ (sections efficaces de diffusion et d'absorption) et l'impulsion diffusée définie par σ_{scat} . La force exercée sur la sphère s'écrit alors comme

$$F_z = \epsilon_0 |\mathcal{E}|^2 [\sigma_{scat} (1 - \overline{\cos\theta}) + \sigma_{abs}] \quad (2)$$

où $\overline{\cos\theta}$ tient compte de la projection de l'impulsion diffusée le long de \hat{z} . Dans le cas d'une stricte rétrodiffusion, $\overline{\cos\theta} = -1$ et l'on retrouve le résultat (1). Ces sections efficaces se calculent exactement par la théorie de Mie qui permet ainsi de décrire très précisément les impacts de la forme de l'objet diffuseur sur la pression de radiation.

D'autres influences sont importantes, telles que la structure spatiale du faisceau lumineux lui-même, sa nature vectorielle (sa polarisation), l'environnement optique, etc. Pour les appréhender et les interpréter facilement, le cadre dipolaire – compris dans la théorie de Mie comme la limite des « sphères petites » vis-à-vis de la longueur d'onde du champ – est bien adapté.

FORCES OPTIQUES DIPOLAIRES

Considérons donc un dipôle électrique \mathcal{P} plongé dans un champ électromagnétique $(\mathcal{E}, \mathcal{H})$. La loi de Lorentz, écrite comme l'action du champ sur les charges formant le dipôle, donne la force instantanée qui s'exerce sur le dipôle

$$\mathbf{F} = (\mathcal{P} \cdot \nabla) \mathcal{E} + \mu_0 \dot{\mathcal{P}} \times \mathcal{H} \quad (3)$$

avec ∇ l'opérateur gradient [3]. On considère ici des champs harmoniques $\mathcal{E} = \text{Re}[\mathbf{E}_0(r)e^{-i\omega t}]$ et $\mathcal{H} = \text{Re}[\mathbf{H}_0(r)e^{-i\omega t}]$ et un dipôle $\mathcal{P} = \text{Re}[\mathbf{p}_0(r)e^{-i\omega t}]$ initialement immobile dans le vide avec $\mathbf{p}_0(r) = \epsilon_0 \alpha \mathbf{E}_0(r)$ et $\alpha(\omega)$ la polarisabilité complexe (prise scalaire ici pour simplifier) du dipôle induit \mathbf{p}_0 . La moyenne temporelle de la force (3) prend une forme compacte bien connue $\langle \mathbf{F} \rangle = \text{Re}[\epsilon_0 \alpha \mathbf{f}_0]/2$ où \mathbf{f}_0 se sépare en deux termes $\mathbf{f}_0 = \rho \nabla \rho - i \rho^2 \nabla \varphi$ dans le cas d'un champ polarisé linéairement $\mathbf{E}_0(r) = \rho(r) e^{i\varphi(r)} \hat{x}$.

Cette séparation donne deux contributions de force, l'une dite réactive

$$\langle \mathbf{F}_r \rangle = \frac{1}{2} \epsilon_0 \text{Re}[\alpha] \rho \nabla \rho \quad (4)$$

engageant la partie réelle de la polarisabilité, et l'autre dite dissipative

$$\langle \mathbf{F}_d \rangle = \frac{1}{2} \epsilon_0 \mu_0 \text{Im}[\alpha] \rho^2 \nabla \varphi \quad (5)$$

engageant la partie imaginaire ●●●

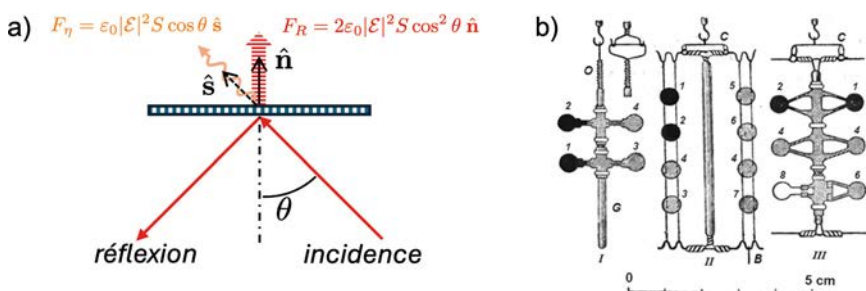
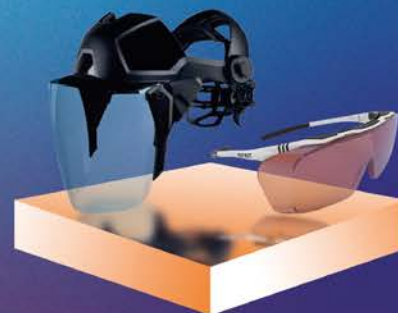


Figure 1. a) Une onde plane éclaire un miroir sous un angle θ . Pour un miroir parfaitement réfléchissant, la variation d'impulsion entre l'onde incidente et l'onde réfléchie $dp_r = (U/c)2\cos\theta \hat{n}$ se transfère au miroir suivant la normale. Pour un miroir absorbant, l'impulsion transférée au miroir s'écrit simplement $p_{(r=1)} = (U/c)\hat{s}$. Sous incidence oblique, la surface effective éclairée est réduite du facteur angulaire $\cos\theta$ par rapport à la surface S éclairée sous incidence normale. Sous incidence normale, ces deux transferts d'impulsion se combinent comme l'Eq. (1). b) Pendule de torsion utilisé par P.N. Lebedev pour tester la prédiction de Maxwell (tiré de [2]). La série de petits miroirs suspendus (miroirs circulaires de diamètre 5 mm, d'épaisseur approchant les 100 microns) aux coefficients de réflexion et d'absorption mesurés (platine, aluminium, nickel), disposés symétriquement de part et d'autre de l'axe de torsion permet de se débarrasser des principaux effets systématiques (comme les effets calorimétriques) et de vérifier l'Eq. (1) quantitativement.

ARDOP
INDUSTRIE



SÉCURITÉ LASER



**SPECTROMETRE
COMPACT**

ARDOP
LIGHTING

SALLE DE LUMIÈRE LED



ardop.com

sales@ardop.com

de la polarisabilité. Pour une onde plane monochromatique, $\nabla\rho = 0$ et $\nabla\varphi = \mathbf{k}$: la force réactive s'annule et seule contribue la force dissipative, dirigée suivant le vecteur d'onde \mathbf{k} . C'est ce terme dissipatif qu'on associe donc naturellement à la pression de radiation.

La discussion s'enrichit évidemment si le champ est spatialement structuré comme c'est le cas d'un faisceau gaussien focalisé, au foyer duquel le gradient d'amplitude est maximal. On peut alors mettre en relation les termes (4) et (5) et obtenir pour un gradient d'amplitude suffisamment fort une force réactive qui domine sur la force dissipative. Dans cette situation, l'interaction

entre le champ et le dipôle est globalement déterminée par le potentiel $U = -\epsilon_0 \text{Re}[a]\rho^2/4$: c'est la nature conservative de $\langle \mathbf{F}_r \rangle$. Pour peu que $\text{Re}[a] > 0$, cette énergie d'interaction augmente en valeur absolue dans la région de forte intensité pour y maintenir, c'est-à-dire y piéger, le dipôle - comme décrit en Fig. 2.

C'est en exploitant le caractère conservatif de cette force réactive et sur ce principe qu'Arthur Ashkin le premier manipule et immobilise de petites sphères diélectriques dès les années 1970. Ces travaux - qui lui vaudront le prix Nobel en 2018 - ont forgé de nombreux outils, comme les pinces optiques, et ont jeté les bases de développements très importants

associés par exemple au refroidissement et à la manipulation d'atomes par laser et plus récemment au contrôle de microsphères piégées dans leur état fondamental quantique de mouvement.

COUPLE DE TORSION OPTIQUE

Le champ électromagnétique dans lequel est plongé le dipôle électrique \mathcal{P} a également tendance à l'orienter sur la polarisation du champ électrique. Ce couple de torsion $\Gamma = \mathcal{P} \times \mathcal{E}$ prend une forme très simple

$$\Gamma = \epsilon_0 \text{Im}[a]\Phi \tag{6}$$

où $\Phi = \mathcal{E} \times \dot{\mathcal{E}}/\omega$ mesure l'ellipticité de la polarisation qui est directement proportionnelle à la densité de moment angulaire de spin \mathbf{S} du champ électrique. Défini sur la partie imaginaire de la polarisabilité, le couple de torsion manifeste un retard entre le champ et la réponse dipolaire, retard associé à l'énergie dissipée.

Certains champs optiques peuvent également impliquer des moments angulaires orbitaux comme les modes Laguerre-Gauss $E(r, \theta, z) = A(r, z)e^{i\ell\theta}e^{ikz}$ dont la phase polaire définit un moment angulaire orbital ℓ . Dans ce cas, le front d'onde du faisceau est en forme d'hélice : on parle de vortex optique de charge topologique ℓ . De tels champs, par le gradient de cette phase - voir l'Eq. (5) - vont exercer sur le dipôle une force dissipative azimutale $\propto \ell \hat{u}_\theta$ qui peut le faire orbiter autour de l'axe optique. Dans une telle configuration, le couplage dissipatif engageant $\text{Im}[a]$ se partage entre un couple de torsion (6) faisant tourner le dipôle sur lui-même avec une intensité proportionnelle à la densité de moment angulaire de spin et une force azimutale qui varie comme le moment angulaire orbital du champ. Pour un dipôle piégé au point focal de ce type de faisceau apparaissent alors des signatures de couplage et de conversion spin-orbite optomécaniques subtils. La Fig. 2 en donne un exemple.

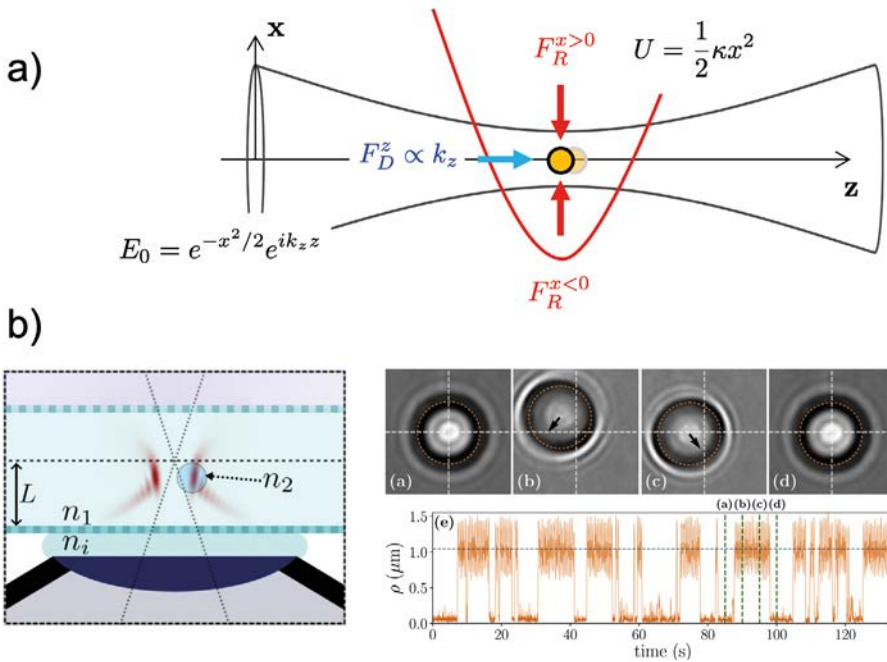


Figure 2. a) Pour un champ gaussien polarisé linéairement et un dipôle décrit par une polarisabilité complexe (représenté ici par une sphère de rayon inférieur à la longueur d'onde du champ optique), la composante dissipative de la force optique $F_D^z \propto k_z$ est une pression de radiation dirigée suivant la direction k_z de propagation du faisceau. La composante réactive s'écrit - dans la limite des petits déplacements du dipôle vis-à-vis de l'axe optique - comme une force de rappel $F_R^x = -\kappa x$ avec une raideur effective $\kappa = \epsilon_0 \text{Re}[a]/2$. Dans ce régime, le dipôle évolue dans un potentiel de piégeage harmonique U . b) Une microsphère est piégée optiquement par un faisceau de Laguerre-Gauss de charge topologique et polarisé circulairement. Ce faisceau possède donc à la fois un moment angulaire orbital ℓ et un moment de spin (polarisation circulaire) qui interagissent comme le montre l'alternance stochastique entre (i) une trajectoire de la microsphère orbitant autour de l'axe optique par l'action de la force azimutale liée au moment orbital et (ii) une rotation de la microsphère sur l'axe optique induite par le couple de torsion de spin (6). Diagramme et image tirés de [4].

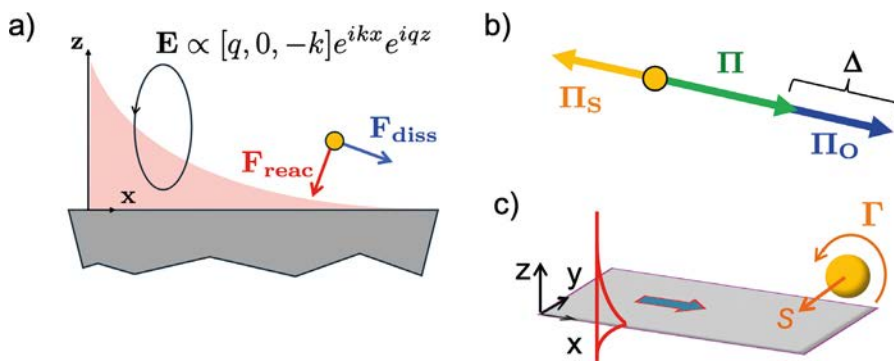


Figure 3. a) Onde évanescente se propageant sur une surface métallique, le plasmon de surface possède une composante longitudinale du champ électrique qui définit une polarisation elliptique dans le plan de propagation (x,z) - et non pas transverse comme dans le cas d'un champ libre. Le caractère complexe des vecteurs d'onde (k,q) donne aux composantes x et z des phases différentes. Le gradient de phase en revanche est identique pour chaque composante et détermine la force dissipative (en bleu sur la figure). La force réactive (rouge) est une force qui piège efficacement le dipôle vers l'interface par le fort gradient d'amplitude du plasmon évanescent. Une composante de spin au vecteur de Poynting est associée à la structure elliptique évanescente de ce champ. Par conséquent, $\Pi = \Pi_o + \Pi_s$ comme décrit en b) et seule la composante orbitale du vecteur de Poynting, augmentée de Δ , détermine la force dissipative. c) Le plan de polarisation étant contenu dans le plan de propagation, la densité de spin S est transverse au vecteur d'onde. Un dipôle subit alors dans le champ proche un couple de torsion Γ orienté transversalement. Cette orientation est verrouillée sur la direction de propagation du plasmon : pour une propagation inversée, le signe du couple l'est aussi.

CHAMPS COMPLEXES

Au-delà de l'impact dynamique des structures spatiale et de phase des faisceaux, on peut aussi discuter des rôles de la polarisation et de l'environnement optique, avec des champs confinés ou localisés. Pour de tels champs, il est fréquent que chaque composante $E_i(\mathbf{r}) = \rho_i(\mathbf{r})e^{i\varphi_i(\mathbf{r})}$ ait sa propre amplitude ρ_i et sa propre phase φ_i . On doit alors généraliser les expressions (4) et (5) qu'on avait dérivées dans le cas simple de la polarisation linéaire. La partie réactive de la force reste conservative : elle peut encore s'écrire comme dérivant du gradient de l'amplitude du champ complexe. En revanche, le gradient de phase pour la partie dissipative doit être remplacé par une moyenne des phases de chaque composante pondérée par leurs amplitudes respectives $\text{Im}[f_0] = -\sum i(\rho_i)^2 \nabla \varphi_i$.

De manière remarquable, cette moyenne des phases pondérées a une interprétation physique claire : elle correspond à la partie orbitale de la moyenne temporelle du vecteur de Poynting Π . On sait en effet

séparer $\Pi = \Pi_o + \Pi_s$, en une composante orbitale $\Pi_o = \text{Im}[f_0]/2\omega\mu_0$ (à partir de laquelle on calcule le moment angulaire orbital $\Lambda_o = \mathbf{r} \times \Pi_o$ et une composante de spin $\Pi_s = \nabla \times \Phi/2\omega\mu_0$). Cette discussion montre donc qu'en général, la pression de radiation est seulement déterminée par la partie orbitale du vecteur de Poynting (et non pas le vecteur lui-même). Le champ électromagnétique transfère donc par dissipation de l'énergie mécanique au dipôle de deux manières : par pression, *via* la partie orbitale du vecteur de Poynting, et par torsion, *via* l'ellipticité -c'est-à-dire le spin du champ.

Cette discussion n'a lieu que si le champ électromagnétique possède soit une densité de spin inhomogène soit une densité de spin non nulle mais un profil d'intensité inhomogène. Cette dernière condition est celle fréquemment rencontrée dans le domaine du champ proche optique où la présence d'une interface brise l'isotropie de l'environnement optique avec des conséquences sur les forces décrites dans la Fig. 3.

La question des symétries est donc centrale pour les forces optiques. On a pu ainsi mettre en évidence ces dernières années de nouvelles forces optiques dites chirales qui émergent d'une brisure de symétrie miroir du champ et de la réponse dipolaire de l'objet. Ces forces dépendent directement de la symétrie droite ou gauche du dipôle chiral et pourraient être utiles pour mettre en place de nouveaux process tout optiques de séparation de molécules chirales. Elles sont étudiées à l'heure actuelle pour les promesses applicatives qu'elles pourraient tenir [5].

CONCLUSION

Les forces optiques sont une manifestation directe des interactions lumière-matière. À ce titre, elles combinent les effets de structure du champ électromagnétique et ceux de forme et de symétrie des objets sur lesquels elles s'exercent. Elles sont donc un excellent révélateur de ces interactions et de leurs potentialités, depuis les échelles micrométriques jusqu'aux échelles atomiques. Elles ont ouvert un domaine de recherche qui continue d'être exploré activement. ●

RÉFÉRENCES

- [1] J.C. Maxwell, "A treatise on electricity and magnetism", 1873, Dover Publications Inc.
- [2] P.N. Lebedev, Ann. Phys. **311**, 433 (1901)
- [3] S. Stenholm, Rev. Mod. Phys. **58**, 699 (1986)
- [4] A.L da Fonseca *et al.*, Phys. Rev. Res. 023226 (2024)
- [5] C. Genet, ACS Photon. **9**, 319 (2022)

ACHETER UNE DÉTECTION SYNCHRONE POUR UN TRAITEMENT DU SIGNAL EN TEMPS-RÉEL

Romain STOMP*, Olivier FAIST

Zurich Instruments AG, Zurich, Suisse

*romain.stomp@zhinst.com



La mesure par détection synchrone (ou lock-in amplifieur en anglais), est la technique idéale pour améliorer le rapport signal-sur-bruit (SNR). Combiné à un traitement numérique des données, c'est tout un environnement d'analyse temps-fréquence qui permet à l'utilisateur d'optimiser sa mesure jusqu'à y inclure des mélanges hétérodynes ou des boucles d'asservissement rapide.

<https://doi.org/10.1051/photon/202312956>

En photonique, la plupart des mesures se font au moyen de capteurs électro-optiques qui permettent de convertir l'information transmise par la lumière en signal électrique. Avec un traitement numérique des données, il est possible d'extraire l'information désirée d'un signal optique qui serait autrement noyé dans le bruit. Contrairement à un simple oscilloscope ou une carte de numérisation faisant l'objet d'un traitement à posteriori, la mesure par détection synchrone est cohérente par rapport à une excitation périodique, ce qui

permet d'extraire à la fois l'amplitude (ou magnitude) et la phase du signal en temps réel. La modulation de l'excitation, à partir de modulateurs électro-optiques (EOM, AOM) par exemple ou tout simplement des hacheurs mécaniques (chopper), sert en même temps de référence à la détection. La mesure issue d'une détection synchrone permet ainsi de rejeter toute source de bruit qui serait asynchrone avec la fréquence de référence.

De nos jours, les meilleurs instruments sur le marché offrent une réserve dynamique de 120 dB [1], ce qui signifie qu'ils sont capables de mesurer avec précision un signal en

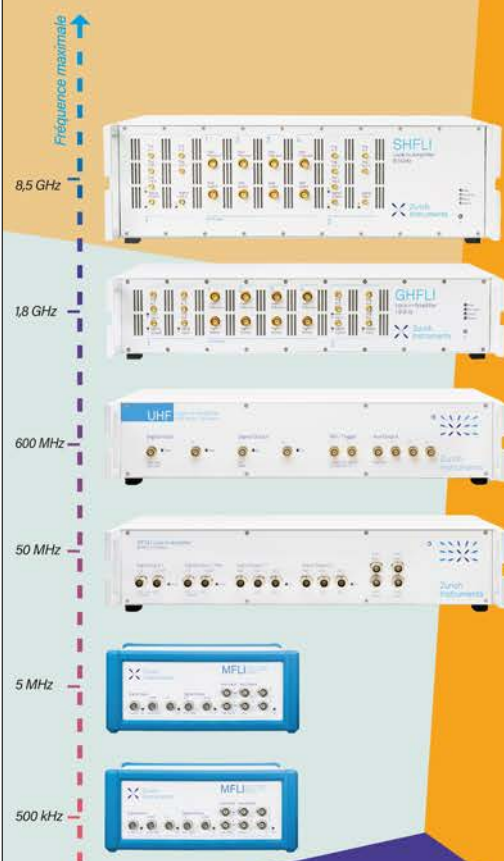
présence d'un bruit dont l'amplitude est jusqu'à un million de fois supérieure à celle du signal d'intérêt.

PRINCIPES DE LA DÉTECTION SYNCHRONE

La mesure synchrone consiste à multiplier le signal d'entrée avec un signal de référence, ce qui revient à faire un mélange homodyne (à la même fréquence entre l'entrée et la référence) ou hétérodyne (fréquence différente), pour ensuite passer le résultat à travers un filtre passe-bas, configurable par l'utilisateur en termes d'ordre du filtre et fréquence de coupure (ou bande passante). Cette étape de démodulation en plus d'extraire

MESURE DE SIGNAUX FAIBLES : DÉTECTION SYNCHRONE ULTRAS PERFORMANTES

- ▲ Mesures de DC à 8.5GHz (suivant les modèles)
- ▲ Précision en courant et en tension
- ▲ Mesures rapides avec un faible niveau de bruit
- ▲ Entrées/sorties auxiliaires reconfigurables
- ▲ L'interface incluant modes Scope, Sweeper, Analyseur de spectres...
- ▲ Options Boxcar, MultiFréquence, PID, PLL ...



l'information sur l'amplitude est sensible à la phase et permet d'isoler le signal à la fréquence d'intérêt parmi toutes les autres composantes fréquentielles.

Le signal de référence peut être généré par l'appareil lui-même, ou donné comme référence depuis une source externe. La référence est habituellement une fonction sinusoïdale, mais peut aussi prendre d'autres formes d'ondes. La démodulation avec une onde sinusoïdale pure permet d'extraire la fréquence fondamentale (ou l'une de ses harmoniques) du signal d'entrée. En revanche, un signal de référence rectangulaire permet lui d'extraire de l'information contenue dans les harmoniques supérieures impaires. Comme illustré sur la figure 2 (a), la réponse du dispositif test (DUT) ayant une forme $V_s(t)$ ainsi que le signal de référence $V_r(t)$ sont utilisés par la détection synchrone pour déterminer l'amplitude R et la phase Θ . C'est en réalité un étage de démodulation faisant appel à deux références, en phase (0°) et en quadrature (90°), comme illustré sur la figure 2 (b). Le signal d'entrée est divisé en deux pour passer à travers deux mélangeurs différents. En sortie, le signal passe à travers des filtres passe-bas, ce qui laisse deux composantes X et Y , en phase et en quadrature par rapport à la référence. A partir de X et Y il est facile de dériver l'amplitude R et la phase Θ par une transformation de coordonnées cartésiennes en coordonnées polaires à l'aide de la relation suivante :

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

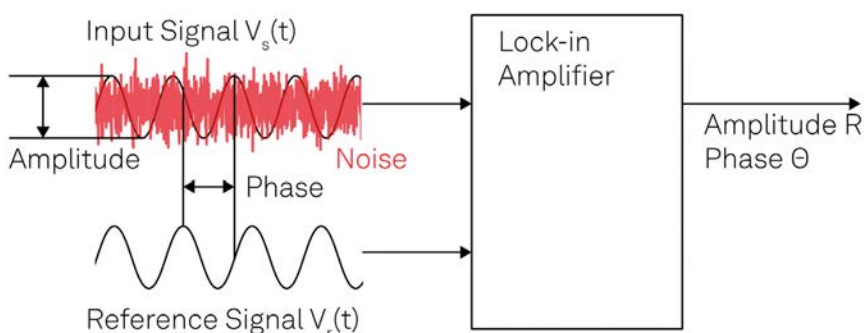
$$\theta = \text{atan2}(Y, X)$$

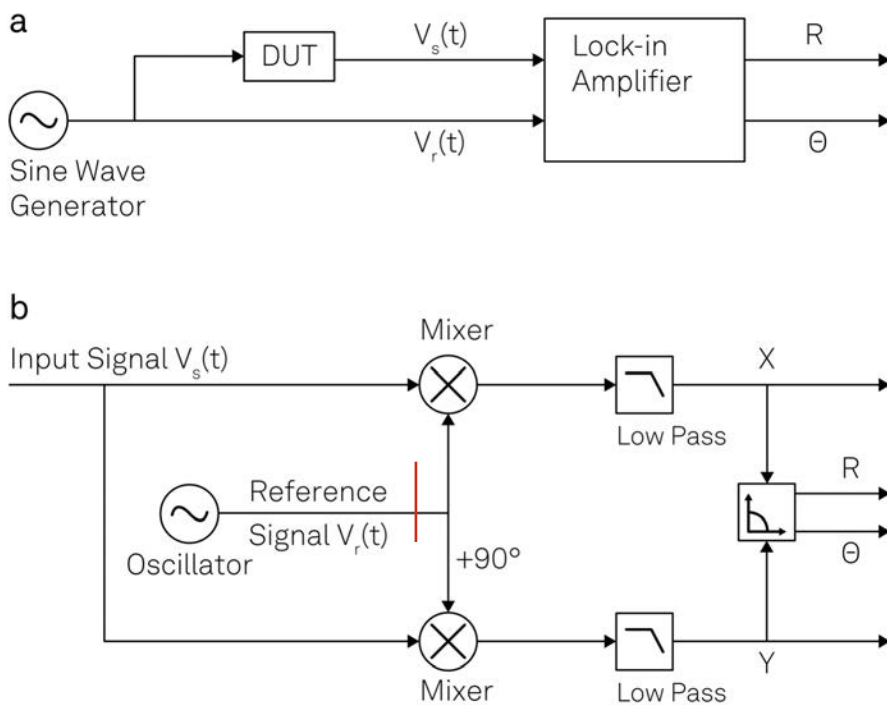
SOURCES DE BRUIT ET OPTIMISATION DES PARAMÈTRES

Le bruit est omniprésent dans les signaux analogiques dont les sources sont multiples. Certains bruits sont fondamentaux, par exemple le bruit de Johnson-Nyquist (thermique), le bruit de grenaille (shot noise) et le bruit de scintillement (flicker noise), tandis que d'autres sont dus à l'instrumentation, comme par exemple les boucles de masse notamment à 50-60 Hz, les interférences électromagnétiques ou certains artefacts de mesures. L'amplitude de ce bruit en tension, notée $V_n(t)$, est spécifiée par son écart-type. Dans le domaine fréquentiel, ce bruit s'exprime sous forme d'une densité spectrale de puissance $|v_n(\omega)|^2$ en unités de V^2/Hz , ou par $|v_n(\omega)|$ en unités de $V/\sqrt{\text{Hz}}$.

Les différentes sources de bruits ont différentes dépendances en fréquences. Il est donc possible de choisir ingénieusement la fréquence de modulation pour effectuer ces mesures dans une bande de fréquence dont le niveau de bruit est au plus bas. Ceci est souvent le cas aux plus hautes fréquences, dans cette partie du spectre principalement dominée par le bruit blanc, tel qu'indiqué sur la figure 3. En d'autres termes, la densité de bruit est moins élevée, pour peu que les perturbations liées aux interférences électromagnétiques radio soient évitées. Pendant longtemps, les détections synchrones étaient limitées à quelques centaines de kHz de modulation de référence. Il est désormais possible de moduler à plusieurs centaines de ●●●

Figure 1. Une détection synchrone permet de mesurer l'amplitude et la phase d'un signal par rapport à un signal de référence, même si le signal est entièrement noyé dans le bruit.





MHz, par exemple pour se caler sur le taux de répétition d'un laser pulsé ou même au GHz pour des mesures sur centre NV ou toute autre transition micro-onde.

En plus de cette fréquence de modulation, deux autres paramètres influencent la qualité de la mesure ou le rapport signal-sur-bruit (SNR) : la bande-passante de démodulation et l'ordre du filtre. Ces valeurs déterminent en effet la faculté à rejeter le bruit en dehors de cette bande passante de mesure (BW). Inversement une bande passante plus large permet de faire des mesures plus rapides, ce qui s'exprime comme constante de temps $\tau = 1/(2\pi BW)$. La largeur de bande est donnée à la fréquence de coupure à -3dB et la pente de décroissance dépend de l'ordre de filtre, typiquement de 1 à 8 pour une pente de plus en plus raide.

Pour finir, une autre façon d'optimiser ces mesures consiste à intégrer les signaux démodulés de la détection synchrone dans un schéma plus complet incluant par exemple une compensation de la dérive, d'une cavité résonnante ou l'asservissement de la fréquence du laser. Cette boucle d'asservissement à l'aide de contrôleur

Figure 2. (a) Schéma de mesure « synchrone ». Un générateur de fonction pilote le dispositif (DUT) et sert aussi de référence. La réponse du DUT est dirigée vers la détection synchrone qui fournit l'amplitude et la phase par rapport à la référence. (b) Schéma de la partie « lock-in amplifieur » : l'entrée est multipliée par la référence ainsi qu'une version déphasée de 90° . Les sorties du mélangeur sont filtrées pour rejeter le bruit et la composante à 2ω puis converties en coordonnées polaires.

de gains PID (pour Proportional - Integral - Derivative), bénéficie comme entrée d'un signal déjà filtré, ce qui permet de plus facilement garder la consigne dans une bande passante donnée. L'intégration de nombreux outils d'analyse temps-fréquence, du balayage de tous les paramètres internes, de boucles d'asservissement et bien plus encore rend les détections synchrones modernes adéquates à repousser les limites de la détection dans les domaines des nanotechnologies, de la nano-optique ou de la spectroscopie résolue en temps.

APPLICATIONS EN PHOTONIQUE
Spectroscopie classique

La plupart des mesures de spectroscopie optique nécessitent une amélioration du rapport signal sur bruit (SNR) pour atteindre des résolutions en énergie toujours plus fine. Un meilleur SNR permet aussi de faire des mesures plus rapides comme par exemple lors d'imagerie Raman, tel qu'illustré sur le Figure 5 pour des mesures avec ou sans détection synchrone. La mesure synchrone permet en effet d'améliorer le contraste de faibles variations du signal modulé par rapport à une lumière en arrière-plan beaucoup plus forte. En plus de la variation

DES DÉTECTIONS SYNCHRONES DE DC À 8.5GHZ

L'analyse de signaux périodiques au moyen de détection synchrone est une méthode établie dans de nombreux domaines de la physique en général et de la photonique en particulier. Longtemps relayé à des mesures basse fréquence, ce marché a beaucoup évolué avec une première solution à 50MHz puis 600MHz dès 2013. Il est désormais possible de couvrir la gamme entière entre le courant continu et 8.5GHz, et même inclure une détection boxcar - combinée avec la détection synchrone dans un système de démodulation tandem. L'approche tout numérique offre en outre la possibilité de mélanger de multiples fréquences en entrée et en sortie et inclure toute une suite d'outils d'analyses temps-fréquence tels qu'un Scope/FFT, analyseur de spectre, asservissement PID, générateur de fonction arbitraire, balayage de tous les paramètres internes, module d'acquisition des données numériques, etc...

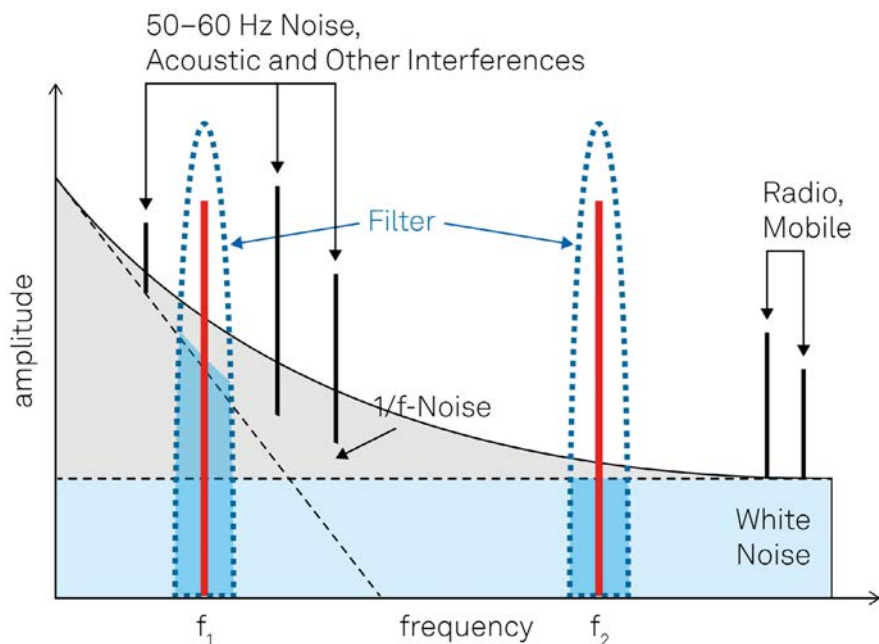


Figure 3. Spectre de bruit typique. Pour des mesures moins bruitées, la fréquence de modulation doit être choisie dans une région dont le bruit de fond est faible, en évitant certains pics discrets d'interférences. Dans cet exemple, f_2 donne de meilleurs résultats que f_1 pour une bande de filtre identique, car elle est située dans une région de bruit blanc, loin du bruit en $1/f$.

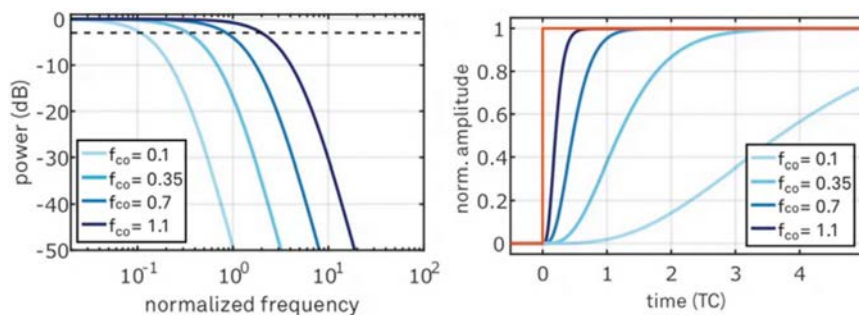
d'intensité de la lumière incidente, le signal en sortie d'une détection synchrone permet aussi de mesurer le décalage en longueur d'onde lié à la phase.

Spectroscopie pompe-sonde

La spectroscopie pompe-sonde est une technique utilisée pour étudier les interactions dans un échantillon. Dans cette méthode, un premier laser, appelé « pompe » excite les échantillons, tandis qu'un second laser, dit "sonde," mesure les

changements induits par cette excitation. La détection synchrone améliore la sensibilité de la détection en synchronisant la mesure avec la fréquence de modulation du signal [3, 4]. En filtrant les bruits non-corrélés, cette technique permet de détecter des variations infimes dans le signal optique. Il est possible de séparer la pompe de la sonde soit temporellement, en envoyant deux impulsions, soit en fréquence, en introduisant deux hacheurs à des fréquences différentes.

Figure 4. Réponse en fréquence (à gauche) et en temps (à droite) des filtres passe-bas pour différentes bande-passantes ayant une fréquence de coupure f_{co} à -3 dB et normalisée en unité de constante de temps $1/\tau$.



Ultra-cold Atoms, Ions, Molecules and Quantum Technologies

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

Current Natural Sciences

QUANTUM INFORMATION

Robin KAISER, Michèle LEDUC and Hélène PERRIN, Eds

Ultra-Cold Atoms, Ions, Molecules and Quantum Technologies

Preface by Alain Aspect

edp sciences

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

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

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

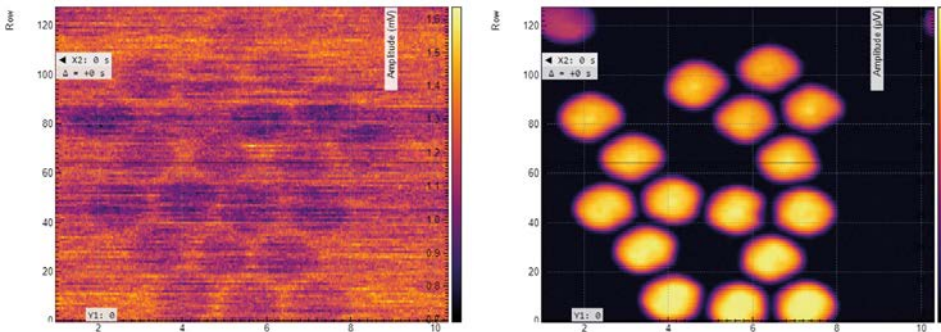


Figure 5. Mesures Raman (Stimulated Raman Scattering) de billes de Polystyrène (PS) sur un substrat de PMMA. A gauche, image obtenue à partir d'une simple numérisation du signal et à droite, le signal en sortie d'une détection synchrone modulée à quelques MHz. Echelle échantillon : $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ voir référence [2]

Caractérisation laser et asservissements

La détection synchrone permet de caractériser les lasers en analysant leur fonction de transfert. Pour la stabilisation, une modulation est introduite devant une cavité et démodulée à la sortie [5]. L'asservissement de cette démodulation assure une stabilité optimale du laser, ce qui est critique dans les applications telles que la spectroscopie ou la communication optique.

Nano-optique et champ proche

Toutes les mesures optiques sont intrinsèquement limitées par la diffraction en termes de résolution spatiale. Pour améliorer cette résolution, non plus de quelques microns mais à l'échelle nanométrique, il est nécessaire de créer une nano-cavité optique entre une pointe diffusante et un échantillon dont les effets non-linéaires sont exaltés. Ce type de configuration apparenté à une mesure AFM (Atomic Force Microscopy) et aussi appelé Scanning Near-Field Microscopy (SNOM), bénéficie de nombreuses possibilités de modulation et démodulation à plusieurs harmoniques ou des techniques de régulation concernant le contrôle de la nano-cavité [6].

CONCLUSION

Une détection synchrone représente un outil précieux pour quiconque cherchant à optimiser ses mesures dans un environnement où le rapport signal sur bruit est particulièrement dégradé. Dans le domaine de la photonique, ces atouts permettent de servir de nombreuses applications ou de

plus en plus rapides pour un même niveau de bruit.

- **Applications polyvalentes :** Idéal pour une variété d'expériences, telles que la spectroscopie optique, y compris résolues en temps ou modulées optiquement, la mesure des caractéristiques des lasers, et l'étude des propriétés des matériaux optiques.
- **Contrôle et interfaçage :** Les modèles lock-in entièrement numériques incluent des interfaces intuitives, y compris leurs API (Application Programming Interface) en Python, Matlab ou LabVIEW, facilitant l'optimisation des paramètres, l'automatisation de la mesure et la mise en place de protocoles de mesure avancée, y compris avec des instruments tiers.
- **Analyse Temps-Fréquence :** les diverses techniques de multiplication et de filtrage synchronisées avec une source de référence permettent d'extraire toutes les informations temps-fréquence pertinentes et ainsi de mieux comprendre comment améliorer son montage expérimental pour une bande d'analyse donnée. ●

réduire la complexité des montages expérimentaux :

- **Sensibilité et vitesse :** Capable de détecter des signaux optiques extrêmement faibles en éliminant le bruit de fond, l'amélioration du rapport signal sur bruit permet de choisir entre des mesures dont la réponse est de plus en plus faible ou à l'inverse faire des mesures de

RÉFÉRENCES

[1] Zurich Instruments MFLI. <https://www.zhinst.com/products/mfli-lock-in-amplifier>. Accessed: 2024-08-23

[2] Fimpel *et al.* Appl. Phys. Lett. **112**, 161101 (2018)

[3] Schumacher *et al.* PNAS **117**, 19773 (2020)

[4] Lo *et al.* Opt. Lett. **38**, 1265 (2013)

[5] Klenner *et al.* Opt. Express **21**, 24770 (2013)

[6] Bechtel *et al.* PNAS **111**, 7191 (2014)

FOURNISSEUR	SITE INTERNET	REVENDEUR FRANÇAIS
Intermodulation Products	www.intermod.pro	Non
Liquid Instruments	www.liquidinstruments.com	PHOT'Innov
Signal recovery	www.ameteki.com	HTDS
Stanford Research Systems	www.thinksrs.com	Acal BFi France, Optoprism
Zurich Instruments	www.zhinst.com	OPTON Laser International

Unité de mesure pour composant semi-conducteur optique



La série AQ2300 SMU de Yokogawa a été développée pour l'évaluation et l'inspection de composants semi-conducteurs optiques et modulateurs. Elle permet de mesurer les caractéristiques I/V ou I/L des diodes laser et celle de microcourants avec une résolution minimale de 1 pA (gamme de 200 nA).

<https://tmi.yokogawa.com/fr/solutions/products/generators-sources/source-measure-units/aq23811a-source-measure-unit/>

LEDs COUPLÉES À LA FIBRE OPTIQUE À COMMANDE NUMÉRIQUE

Grâce à un pilote et à un contrôleur intégrés, il est possible de contrôler une large gamme de paramètres des LEDs à l'aide de l'interface logicielle. Ces LEDs offrent une longue durée de vie sans avoir recours à des ventilateurs bruyants. Elles sont idéales pour les applications médicales et des sciences du vivant.



<https://www.edmundoptics.fr/digital-fiber-coupled-leds/40123/#>



Caméra sCMOS rapide

La caméra pco.edge 26 DS CLHS développée par Excelitas PCO offre une cadence élevée et une haute résolution en combinant la qualité d'image d'un capteur global shutter de 26 MPixels et un transfert de données rapide et propre. Son mode double shutter permet un temps inter-image de 350 ns, idéal pour capturer des processus dynamiques rapides.

<https://photonlines-recherche.fr/produit/camera-pco-edge-26-ds-clhs/>

COMPTEUR DE PHOTONS

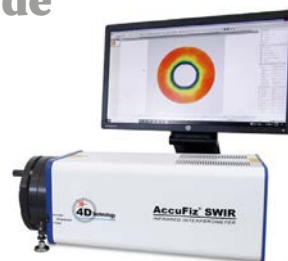


Le PicoHarp 330 est un système de comptage de photons avec corrélation temporelle (TCSPC-Time-Correlated Single Photon Counting) conçu pour des applications requérant jusqu'à cinq canaux. Chaque canal fonctionne indépendamment mais peut se synchroniser avec les autres. Si aucune synchronisation n'est requise, l'entrée de synchronisation peut être utilisée comme un canal de détection supplémentaire. Cette fonctionnalité facilite des tâches telles que la corrélation de coïncidence ou le comptage de coïncidence.

https://www.picoquant.com/products/category/tcspc-and-time-tagging-modules/picoharp_330_precise_and_versatile_event_timer_and_tcspc_unit

Interféromètre de Fizeau SWIR

Le nouvel interféromètre Fizeau AccuFiz SWIR fonctionne autour de la longueur d'onde de 1550 nm. La résolution de la caméra est de 1024 x 1024. L'interféromètre est adapté à des sources externes pour des longueurs d'onde couvrant toute la bande C, permettant aux fabricants de tester des composants et des systèmes optiques à chaque longueur d'onde opérationnelle entre 1535 nm et 1565 nm. Il intègre une interférométrie dynamique lui permettant des mesures dans des environnements difficiles, sans isolation.



<https://4dtechnology.com/2024/12/09/4d-technology-receives-multiple-orders-for-new-high-resolution-vibration-immune-accufiz-swir-interferometer/>



EPIC is here
to support you!

Be part of the largest Photonics
Industry Community in Europe