

Photoniques

LA LUMIÈRE ET SES APPLICATIONS

40 ANS SFO

Les prix de la Société
Française d'Optique

FOCUS

La photonique
en région Grand Est

OSEZ L'OPTIQUE

Quand la polarisation
inspire l'art

COMPRENDRE

Les processus
Raman cohérents

DOSSIER

SPECTROSCOPIE OPTIQUE

- Spectroscopie et imagerie Raman :
des matériaux quantiques à la matière vivante
- La spectroscopie TéraHertz:
électrons et vibrations
- Spectroscopie à deux peignes
de fréquences électro-optiques pour
la mesure de rapports isotopiques
- Spectroscopie haute résolution :
l'apport des ions piégés refroidis par laser



DAY OF PHOTONICS

21 OCTOBER 2023

Every company, school, organization, association, university, and individual is invited to participate!

Organise an activity for Day of Photonics!

www.day-of-photonics.org

DAY OF PHOTONICS disseminates "photonics" towards the general public. It is an initiative of EPIC, the industry association that promotes the sustainable development of organisations working in the field of photonics. EPIC fosters a vibrant photonics ecosystem by maintaining a strong network and acting as a catalyst and facilitator for technological and commercial advancement.



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

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

Siège social : 33 rue Croulebarbe,
75013 Paris, France
Tél. : +33(0)1 44 08 67 10
CPPAP : 0124 W 93286
ISSN : 1629-4475, e-ISSN : 2269-8418

www.photoniques.com

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

Directeur de publication

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

Rédaction

Rédacteur en chef
Nicolas Bonod
nicolas.bonod@edpsciences.org

Journal Manager
Florence Anglézio
florence.anglezio@edpsciences.org

Secrétariat de rédaction et mise en page
Agence de communication la Chamade
<https://agencelachamade.com/>

Comité de rédaction

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

Advertising

Annie Keller
Cell phone: +33 (0)6 74 89 11 47
Phone/Fax: +33 (0)1 69 28 33 69
annie.keller@edpsciences.org

International Advertising

Bernadette Dufour
Cell phone + 33 7 87 57 07 59
bernadette.dufour@edpsciences.org

Photoniques est réalisé par
EDP Sciences,
17 avenue du Hoggar,
P.A. de Courtaboeuf,
91944 Les Ulis Cedex A, France
Tél. : +33 (0)1 69 18 75 75
RCS : EVRY B 308 392 687

Gestion des abonnements

abonnements@edpsciences.org

Impression

Fabrègue imprimeur
B.P. 10
87500 Saint-Yrieix la Perche
Dépôt légal : Août 2023
Rotage : STAMP (95)



Éditorial



NICOLAS BONOD

Rédacteur en chef

Émerveillons-nous !

L'essor de la vision dans le règne animal nous montre combien la lumière est précieuse pour appréhender notre environnement. La spectroscopie optique s'inscrit dans cette perspective. En analysant la réponse spectrale issue des interactions entre la lumière et la matière, elle révèle des informations sur la nature de la matière observée. La panoplie des techniques spectroscopiques ne finit pas de s'étoffer afin d'exploiter toute la richesse de l'interaction lumière-matière, et ce, sur une large gamme de fréquences. La demande est forte afin de caractériser la matière, des confins de l'univers pour identifier l'atmosphère d'exoplanètes aux microéchantillons placés sous l'objectif de microscopes. La caractérisation optique d'espèces chimiques ou biologiques est un enjeu applicatif majeur, et la spectroscopie optique ne cesse d'étendre son champ d'investigation. Elle motive le développement de nouvelles sources de lumière pour combler les besoins en caractérisation et en métrologie dans de multiples gammes de longueurs d'onde. Avec la spectroscopie, c'est l'ensemble de la photonique qui avance pour faire progresser nos connaissances sur la matière, et pour mieux répondre aux enjeux que sont la santé, l'énergie ou l'environnement. Nous vous proposons dans ce numéro un dossier complet de 4 articles qui couvrent les thèmes de la spectroscopie Raman, de la spectroscopie THz, de la spectroscopie à double peigne et de la spectroscopie haute résolution d'ions piégés

refroidis par laser, dossier complété par l'article Comprendre les processus Raman cohérents.

Nous poursuivons notre exploration des régions françaises pour mettre en lumière les actions régionales spécifiques qui visent à renforcer l'offre de formation, le tissu industriel ou encore les collaborations entre acteurs industriels et académiques. Focus dans ce numéro sur la région Grand Est. Cette région s'appuie sur une expérience riche dans les domaines de l'optique et de la photonique, et bénéficie aujourd'hui d'une forte dynamique. L'institut de photonique qui est en cours de création pour être prochainement installé à Metz en est l'un des meilleurs symboles.

Immergeons-nous enfin dans *Le Rayon Extraordinaire*, exposition qui a réuni durant l'hiver 2022-2023 à Rennes une vingtaine d'œuvres autour du thème de la polarisation de la lumière. Ce projet a été conçu et imaginé par un collectif regroupant des artistes et un scientifique. Et le succès fut au rendez-vous puisque ce ne sont pas moins de 30000 spectateurs qui découvrirent ces œuvres artistiques, et scientifiques !

Tous ces sujets nous aident à réaliser combien la thématique de l'optique photonique est enrichissante et stimulante. Car en plus de se révéler jour après jour comme une technologie clé pour affronter les défis du futur, elle n'en finit pas de nous émerveiller sur notre monde, de stimuler notre intellect et d'éveiller nos sens.



Sommaire

www.photoniques.com

N° 121

16

40 ANS DE LA SFO
Les prix de la Société Française d'Optique

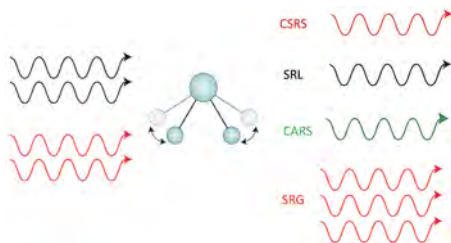


26

« *Le Rayon Extraordinaire* »...
quand la polarisation inspire l'art

52

Comprendre les processus Raman cohérents



ACTUALITÉS

- 03 Éditorial et actualité de la SFO
- 05 Informations partenaires
- 11 Mots-croisés sur le thème de la spectroscopie optique
- 12 Actualités scientifiques
- 14 Entretien : Nicolas Forget, CNRS

40 ANS DE LA SFO

- 16 Les prix de la Société Française d'Optique

FOCUS

- 20 La photonique en région Grand Est

OSEZ L'OPTIQUE

- 26 « *Le Rayon Extraordinaire* »... quand la polarisation inspire l'art

DOSSIER : SPECTROSCOPIE OPTIQUE

- 31 Spectroscopie et imagerie Raman : des matériaux quantiques à la matière vivante
- 36 La spectroscopie Térahertz : électrons et vibrations
- 42 Spectroscopie à deux peignes de fréquences électro-optiques pour la mesure de rapports isotopiques
- 47 Spectroscopie haute résolution : l'apport des ions piégés refroidis par laser

COMPRENDRE

- 52 Les processus Raman cohérents

PRODUITS

- 57 Nouveautés

Annonces

2B Lighting 41	Edp Sciences 09	NKT Photonics IV^e de couv.	Toptica 39
ARDOP 17	EPIC II^e de couv.	Opton laser 29, 49	Trioptics 23
Comsol 25	HTDS 27	Pro-Lite 33	Yokogawa 37
ECOC 19	IDIL 35, 51	Spectrogon 43	
	Imagine optic 45	Spectros 21	

Crédit photo (couverture) : iStockPhoto

L'édito de la SFO



ARIEL LEVENSON

Président de la SFO

La quarantaine bien portante et une pose estivale bienvenue !

Les célébrations du quarantième anniversaire de la SFO se poursuivent dans ce numéro avec l'article sur les Prix de la SFO proposé par notre cher président sortant, Philippe Adam. Les rencontres du Club JNOG ont également été le cadre de multiples célébrations sous le signe de la quarantaine. En effet, il s'agissait de la quarantième édition des JNOG et sous l'égide de Christian Grillet de l'Institut des nanotechnologies de Lyon, les collègues lyonnais qui les ont accueillis ont réussi une cuvée remarquable. Au rendez-vous un record de participation, un programme scientifique excellent, une belle exposition industrielle et un regain de jeunesse. Le Club Jeunes SFO, récemment créé y a organisé son premier évènement, une rencontre-échange avec notre fidèle Alain Aspect, à laquelle ont participé les 180 présents ainsi qu'un grand nombre de jeunes à distance grâce à la retransmission en direct sur notre chaîne YouTube. Une occasion également pour célébrer les quarante ans de la thèse d'Alain, thèse dans laquelle étaient présentées ses trois démonstrations de violation des inégalités de Bell.

Les JNOG ont également été le siège de la cérémonie de remise du Prix Jean Jerphagnon. A nos trois Prix prestigieux, s'ajoute désormais le non moins prestigieux Prix Jean Jerphagnon. J'ai déjà eu l'occasion de dire toute la fierté que j'éprouve de le voir rejoindre la SFO. Jean, pionnier de l'optique non-linéaire en France, fervent promoteur de l'interface académie-industrie, a été membre du tout premier Conseil

d'Administration de la SFO. Je remercie Alain Aspect, Jean-Luc Beylat, François et Olivier Jerphagnon pour leur confiance qui a rendu ce rapprochement possible. Félicitations à Niccolo Somaschi, co-fondateur de Quandela et lauréat d'une édition 2023 particulièrement relevée.

Le Laboratoire de Physique des Lasers vient également de fêter son anniversaire. 50 ans déjà qu'après avoir initié l'épopée du laser au sein du Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne (aujourd'hui LKB), Bernard Decomps, Michel Dumont et Martial Ducloy initiaient celle des lasers au sein de l'Université de Paris Nord. Longue et fructueuse vie scientifique au LPL !

Je vous souhaite un bel été, radieux et tempéré, qui vous permette de vous ressourcer. La rentrée s'annonce quant à elle bien excitante avec EOSAM 2023 à Dijon du 11 au 15 septembre, une collaboration EOS et SFO dont tous les feux sont au vert. Je me réjouis par avance d'y retrouver bon nombre d'entre vous et suis particulièrement ému en pensant à la rencontre-célébration du quarantième anniversaire SFO lors du dîner de Gala auquel une vingtaine de nos anciens présidents et personnalités historiques nous feront l'honneur et l'amitié de participer.

Bonne lecture et bel été !

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

40^e Journées Nationales d'Optique Guidée Club JNOG de la SFO

INL, l'Institut des Nanotechnologies de Lyon

« Les Journées Nationales d'Optique Guidée (JNOG) organisées à Lyon se terminent. Cet événement national rassemble depuis maintenant 40 ans la communauté de l'optique française dont l'excellence n'est plus à démontrer. L'occasion de faire le point sur l'optique et la photonique en France avant le cœur de l'été. Nos travaux sur les technologies à cascades quantiques pour la transmission de données ont fait l'objet d'une présentation orale invitée et d'une présentation poster. Merci à la SFO – la Société Française d'Optique, à Florence HADDOUCHE ainsi qu'à Christian GRILLET et toute son équipe de l'Institut des Nanotechnologies de Lyon (INL) pour avoir organisé cet événement d'une main de maître. Beaucoup de monde, de très très bons exposés avec en prime une superbe discussion avec le prix Nobel 2022 Alain Aspect organisée par le Club Jeunes SFO. Bref un très grand cru pour cette édition 2023. Félicitations à toutes et tous et bon été. »

Témoignage de Frédéric GRILLOT (Institut Polytechnique de Paris, Université de Paris Diderot) - conférencier invité des JNOG

Prix Jean Jerphagnon 2023

Le prix Jean Jerphagnon 2023 récompense Niccolo SOMASCHI, directeur technique et co-fondateur de Quandela, pour sa contribution exceptionnelle à l'informatique quantique.

Lors des JNOG Lyon 2023, Alain ASPECT, prix Nobel de Physique 2022 et président du jury du prestigieux prix Jean Jerphagnon, a chaleureusement félicité Niccolo SOMASCHI, directeur technique et co-fondateur de Quandela, pour sa contribution exceptionnelle à l'avancement de l'informatique quantique. Cette distinction remarquable met en lumière son rôle clé dans le développement de Quandela, start-up de premier plan dans le domaine de la photonique quantique. Après avoir obtenu son doctorat, Niccolo SOMASCHI a rejoint l'équipe de Pascale SENELLART, directrice de recherche au Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies (C2N, CNRS, Université Paris-Saclay). Ensemble, ils ont rapidement reconnu l'extraordinaire potentiel des sources de photons uniques qu'ils ont développées, et ils ont réussi à transformer le prototype de laboratoire de recherche fondamentale en un produit fiable, devenu un composant de base de systèmes d'information quantique. Fondée dans l'incubateur du CNRS avec Valérian Giesz, Quandela ouvre en 2023 une nouvelle ère dans le domaine de l'informatique quantique avec l'inauguration de sa première usine d'ordinateurs quantiques, au voisinage de l'université Paris-Saclay. Grâce à cette avancée industrielle, Quandela s'affirme comme un acteur majeur dans la technologie photonique quantique.



Alain ASPECT a aussi chaleureusement félicité les 6 nominés du prix Jean Jerphagnon 2023 :

- **Perrine BERGER** (Thales Research and Technology) pour la réalisation d'un démonstrateur transportable de surveillance du spectre des signaux électromagnétiques avec des performances inégalées, grâce aux propriétés exceptionnelles des cristaux dopés aux terres rares.
- **Julien LAURAT** (Sorbonne Université, Laboratoire Kastler Brossel) pour le développement de mémoires quantiques pour la lumière reposant sur des atomes refroidis par laser.
- **Elise COLIN** (ONERA) pour la mise en place de la technologie d'imagerie de speckle dynamique au service de la médecine.
- **Delphine MARRIS-MORINI** (C2N/Université Paris Saclay) pour les avancées en spectroscopie optique dans la gamme spectrale du moyen infra-rouge pour identifier les substances chimiques et biologiques et effectuer des diagnostics non invasifs.
- **Hilton BARBOSA DE AGUIAR** (Laboratoire Kastler Brossel - CNRS) pour le développement d'une approche originale de microscopie Raman computationnelle.
- **Pierre BROCHARD** (Président & Co-fondateur de SILENTSYS) pour rendre accessible des innovations DEEPTTECH pour faire avancer la recherche et l'industrie.



Un grand bravo au Club Jeunes de la SFO qui a organisé dans le cadre des JNOG, un échange passionnant avec Alain Aspect (Photo de droite : Alain Aspect dialoguant avec Melissa Hedir et Paul Jimenez, co-animateurs du Club Jeunes).

Crédits photos ©Vincent NOCLIN

Souveraineté industrielle, enjeux de société... La photonique répond présent !

Photonics France a organisé le 22 juin à l'Assemblée nationale une conférence et une exposition sur les technologies photoniques au service des enjeux de société actuels. La journée était parrainée par **Éric Bothorel**, député des Côtes d'Armor, et soutenue par **Roland Lescure**, ministre délégué chargé de l'Industrie.



P rès de 150 acteurs et partenaires de la filière étaient rassemblés pour présenter leurs savoir-faire aux décideurs publics à travers des objets technologiques tangibles* : caméra rétinienne (Imagine Eyes), caméra infrarouge (Lynred et Senssight), corde optique (IDIL), display de lasers (Oxxius), miroir pour télescopes (Kerdry), casque de pompier (Savimex)... L'enjeu climatique était notamment illustré par les interventions des sociétés UV Boosting (stimulation de végétaux sans pesticides) et Horiba (analyse des microplastiques)*.

Le besoin croissant de main d'œuvre était un sujet prédominant pour les différents intervenants. Pour y répondre, Photonics France travaille avec le ministère de l'Éducation nationale, les rectorats d'académie et l'OPCO 2i sur plusieurs projets :

- mise en place d'un bac pro « Optique Photonique : Technologies de la Lumière » à la rentrée 2024,
- refonte du BTS « Systèmes photoniques »,
- publication d'un Zoom ONISEP sur les métiers de l'électronique et la photonique.

*Retrouvez la présentation des différents objets photoniques sur notre site web : <https://www.photonics-france.org>

THIERRY GEORGES, NOUVEAU PRÉSIDENT DE PHOTONICS FRANCE

Photonics France tenait le même jour son Assemblée générale. À cette occasion, **Thierry Georges** a été nommé président de Photonics France.

Thierry Georges, PDG d'Oxxius, a été nommé président de Photonics France lors de son Assemblée générale qui s'est tenue le 22 juin avant l'exposition-conférence de valorisation de la photonique (voir plus haut). Il remplace Thierry Dupoux, directeur de l'Innovation chez Safran, qui devient vice-président représentant du collège des industriels. Patrice Le Boudec, PDG d'Idil Fibres Optiques et président de Photonics Bretagne, reste vice-président représentant du collège des associatifs. François Houbre, directeur général de SAVIMEX, prend quant à lui le poste de trésorier.



NOUVEAUX ADHÉRENTS



Bienvenue à nos nouveaux adhérents : **Télécom Saint-Etienne**, **Eurocomposant**, **SATT Nord**, **Photonics Open Projects**.

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

AGENDA

■ **French Photonics Days #5 : inscrivez-vous rapidement !**
17-18 octobre 2023 – Strasbourg
 Photonics France, SupOptique Alumni et l'Université de Strasbourg (Laboratoire ICube) coorganisent la 5^e édition des French Photonics Days à Strasbourg sur le thème : « Les procédés photoniques pour la santé et l'industrie ». Programme et inscription sur le site dédié à l'évènement : <https://fpd2023.fr>
Évènement gratuit pour nos adhérents.

NOS PROCHAINS RENDEZ-VOUS :

Conférence : du matériau au composant photonique
 Évènement Alpha-RLH en partenariat avec Photonics France
11-12 octobre 2023 - Bordeaux

Business Meeting : La Photonique pour l'Agriculture
novembre 2023 – Rennes

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

SPIE Photonics Europe
7-11 avril 2024 - Strasbourg

CONTACT PHOTONICS FRANCE
contact@photonics-france.org
www.photonics-france.org

Nouveau lieu pour le Forum de la Photonique

Le Forum de la Photonique est un événement rassemblant des professionnels des secteurs de la photonique et de ses applications pour partager des idées et des innovations. Il favorise les échanges entre étudiants et professionnels et offre des opportunités de recrutement – stages, emplois et thèses. Cette année, pour la première fois, le Forum de la Photonique se déroulera au château de Saint-Léger sur le campus d'iXcampus à Saint-Germain-en-Laye (78), offrant une plus grande capacité d'accueil et un cadre magnifique. Autre nouveauté pour l'édition 2023, des tables rondes ouvertes à toutes et tous seront organisées sur des thèmes variés. La date à retenir ? 30 novembre 2023 !

CONTACT :
forum.photonique@institutoptique.fr

Le mot du président : « Entreprises et laboratoires, nous vous encourageons à participer à cet événement exceptionnel et à partager vos connaissances et votre expérience avec cette grande communauté. Ensemble, nous pouvons contribuer au développement de la recherche et de l'industrie, et former la prochaine génération de leaders dans des domaines passionnants. »

AGENDA

■ **Lumière sur la physique quantique – Portes ouvertes pour la Fête de la science – 7 et 8 octobre 2023 à l'Institut d'Optique (Palaiseau)**

■ **Forum de la Photonique 30 novembre 2023 à iXcampus (Saint-Germain-en-Laye)**

■ **Gala SupOptique 1^{er} décembre 2023 au Flow (Paris)**

■ **Remise des diplômes 15 décembre 2023 à l'Institut d'Optique (Palaiseau)**

Science et convivialité : une journée en l'honneur d'Alain Aspect, prix Nobel de Physique 2022

Le 8 juin dernier, les locaux de l'Institut d'Optique Graduate School à Palaiseau se sont transformés en une véritable fourmilière à l'occasion de la conférence « Quantum Physics : from foundations to innovations » organisée en l'honneur d'Alain Aspect, lauréat du Prix Nobel de Physique 2022. Plus de 300 personnes se sont déplacées pour écouter les prestigieux orateurs nationaux et internationaux et profiter de précieux moments d'échanges.



Célébration d'une carrière riche

Au cours de la journée, une dizaine d'intervenants ont retracé la carrière d'Alain Aspect, parmi lesquels des orateurs internationaux de renom, Eric Cornell, Nicolas Gisin, Bill Phillips et de proches collaborateurs ou anciens étudiants, Philippe Grangier, Jean Dalibard, Chris Westbrook, Vincent Josse.

Au-delà des expériences des inégalités de Bell qui lui ont valu son prix Nobel, les présentations ont mis en avant des résultats récents dans les domaines qu'Alain Aspect a marqués de son empreinte : le refroidissement d'atomes, l'optique quantique atomique, la localisation d'Anderson...

Des interventions scientifiques d'Antoine Browaeys, Pascale Senellart et Bruno Desruelle à propos de technologies quantiques ayant donné lieu, respectivement, à la création des sociétés Pasqal, Quandela et Muquans (maintenant Exail) ont permis de faire la connexion entre recherche et applications technologiques.

« Le meilleur moyen de me faire plaisir, c'est de mélanger science et amitiés »

En dehors de brillantes interventions scientifiques, la journée a été ponctuée de moments d'émotion et de convivialité. Les intervenants ont notamment profité de leurs présentations pour faire des clin d'œil aux périodes où ils ont collaboré avec Alain Aspect au travers de jubilatoires photos d'archives.

En cette journée si spéciale, l'Institut d'Optique a eu la fierté d'accueillir entre ses murs cinq prix Nobel de Physique. Serge Haroche, lauréat en 2012, a fait une prise de parole surprise pour conclure la conférence.

Un lien fort avec l'Institut d'Optique

La journée s'est achevée par un moment historique : Alain Aspect a offert à l'Institut d'Optique une réplique de sa médaille Nobel. C'est une magnifique reconnaissance de l'ouverture et de l'agilité du modèle de l'Institut d'Optique et de sa capacité à accepter de grandes prises de risques pour donner lieu à d'aussi belles aventures.

Merci au soutien de nos partenaires : Société Française de Physique, Société Française d'Optique, Université Paris-Saclay, Exail, Pasqal, Quandela, Fondation iXCore.

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

[Convention générale Systematic] So Deep Tech 2023 !

Pour cette première année de la Phase 5 de la politique nationale des Pôles de Compétitivité (2023-2026), il nous paraissait important de proposer à notre écosystème un événement comme nous n'en avons jamais vu chez Systematic.

Un événement totalement dédié aux besoins de nos adhérents, qu'ils soient technologiques, business, RH, stratégiques, ... Un événement qui soit la vitrine de notre offre de service résolument liée aux Deep Tech. Parce que depuis sa création en 2005, Systematic vit au rythme des Deep Tech, anime un riche écosystème d'innovation Deep Tech, expertise et accompagne les projets Deep Tech de ses adhérents.



[Mission Midy]

Systematic apporte son expérience à la Mission Midy !

Jean-Luc Beylat, Président de Systematic, a eu l'honneur de recevoir, le 9 juin, le député du Plateau de Saclay, Paul Midy, pour échanger au sujet de l'expérience de notre pôle de compétitivité sur le financement des entreprises, notamment à travers notre Collège des Investisseurs.



À la demande de la Première Ministre, le député du Plateau de Saclay, Paul Midy, a mené une mission gouvernementale visant à soutenir l'investissement dans les start-up & les PME innovantes. 275 experts ont été auditionnés dans le cadre de sa mission : Autorités

et administrations publiques, associations professionnelles, fonds d'investissement, start-ups, assureurs, banques et réseaux de distribution, académiques et parlementaires.

Jean-Luc Beylat et Paul Midy ont donc pu échanger longuement, le 9 juin, sur la qualité des prestations d'accompagnement dédiées au financement des entreprises proposées par le Pôle.

Paul Midy a rendu son rapport, le mercredi 14 juin. Ses propositions permettraient de rapporter 3,5 milliards d'euros supplémentaires par an à l'écosystème.

Dans ce cadre, Paul Midy et Jean-Luc Beylat ont répondu à l'interview de Martin Greenacre, un journaliste britannique, pour Science Business, un media en ligne basé à Bruxelles.

En bref

Un nouveau membre Optics & Photonics : Ligentec

LIGENTEC est une entreprise fabriquant des circuits Intégrés photoniques (PIC) pour des clients dans des domaines des hautes technologies tels que les communications, les technologies Quantiques, le LiDAR et les Biocapteurs.

Un nouveau membre Optics & Photonics : l'Institut Carnot Star

L'Institut Carnot Star est un dispositif public dédié au développement de la recherche partenariale dans le domaine du Sport - Santé - Bien-être. Il offre aux industriels un panel d'expertises scientifiques et des moyens technologiques pour les accompagner sur des projets R&D et d'innovation. Cet Institut travaille sur divers axes de recherches : étude du mouvement humain, performance, ergonomie, sécurité, imagerie biologique et médicale, nutrition et pharmaceutique, mesures embarquées, objets connectés, science des données.

AGENDA

■ PhotonHub Demo centre,
19 octobre 2023, Silicon Photonics :
Build your own chip, Optoelectronics
Research Centre, University of
Southampton

■ Photonics Excellence Day #5
23 novembre 2023, IOGS, 2 Av.
Augustin Fresnel 91120 Palaiseau

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



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

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

Retour sur le Forum des adhérents 2023

Le forum des adhérents du pôle s'est tenu le 8 juin 2023 au stade Matmut Atlantique à Bordeaux.



Quelques 200 participants - adhérents et partenaires - étaient présents à ce rendez-vous annuel incontournable pour échanger de l'information, partager une journée de networking et de convivialité.

La matinée a été dédiée à l'Assemblée Générale qui a dressé le bilan des actions 2022 et les grandes lignes de l'animation 2023 ainsi qu'à la signature d'une convention de partenariat avec le Centre Technologique CANOE (composites et matériaux avancés).

Le pôle a ensuite proposé un focus sur les *deep-tech* dans le sport autour de conférences et de pitches d'entreprises.

Un espace exposition a permis à 21 adhérents de présenter leur expertise et leurs technologies.

Merci à Alliaserv, partenaire officiel du forum, pour son soutien !

AGENDA

■ **Forum Emploi & Industries Aérospatiale - Spatial - Défense**
14 septembre à Bordeaux

■ **Journées « Du matériau au composant photonique »**
11 et 12 octobre à Léognan

■ **BIPSA : Rencontre des acteurs de la Bio-Imagerie en Nouvelle-Aquitaine**
30 novembre à Bordeaux

Tous les événements sur
www.alpha-rlh.com

LES TECHNOLOGIES QUANTIQUES À L'HONNEUR AUTOUR D'ALAIN ASPECT, PRIX NOBEL DE PHYSIQUE 2022

© Alexandre Duperyron



Plus de 200 personnes, industriels et académiques de l'écosystème quantique, étaient réunies le 11 juillet 2023 lors de la « Journée Quantique en Nouvelle-Aquitaine ».

L'évènement s'est déroulé à l'Institut d'Optique d'Aquitaine à Talence autour de 3 invités d'honneur : Alain Aspect, Prix Nobel de Physique 2022, Etienne Klein, Physicien, Philosophe des sciences

et Christophe Salomon, Physicien, membre de l'Académie des Sciences.

Organisée par le NAQUIDIS Center, l'Institut d'Optique Graduate School, le pôle ALPHA-RLH, la Région Nouvelle-Aquitaine, le CNRS, les universités de Bordeaux et de Limoges, en partenariat avec ALPhANOV et avec le soutien d'Exail, la journée visait à :

- Faciliter la compréhension du quantique,
- Mettre en lumière les technologies développées par des entreprises françaises,
- Favoriser les échanges et les collaborations entre industriels et chercheurs,
- Promouvoir la physique et l'informatique afin de susciter des vocations dans les filières scientifiques.

Dédié aux technologies quantiques, le NAQUIDIS Center est un outil collaboratif autour de 3 axes : les capteurs, la communication et la *supply chain*. Ces technologies visent à répondre à des enjeux sociétaux et à apporter des solutions concrètes à diverses problématiques, notamment pour la santé, la géophysique, la navigation, la cryptographie...

Les technologies issues de la physique quantique fonctionnent déjà, et la Nouvelle-Aquitaine est une place forte !

Trois démonstrateurs technologiques innovants présentés au Salon du Bourget

Du 19 au 25 juin 2023, le pôle ALPHA-RLH était présent au Salon International de l'Aéronautique et de l'Espace (SIAE) à Paris-Le Bourget, sur le Pavillon Région Nouvelle-Aquitaine.

Il accompagnait trois démonstrateurs innovants utilisant des technologies photoniques et hyperfréquences, présentés en avant-première dans le cadre de la démarche d'innovation collaborative SAPHyR*. Ces innovations ont été développées par des adhérents du pôle (grands groupes, entreprises, laboratoires et centres de transfert technologiques) :

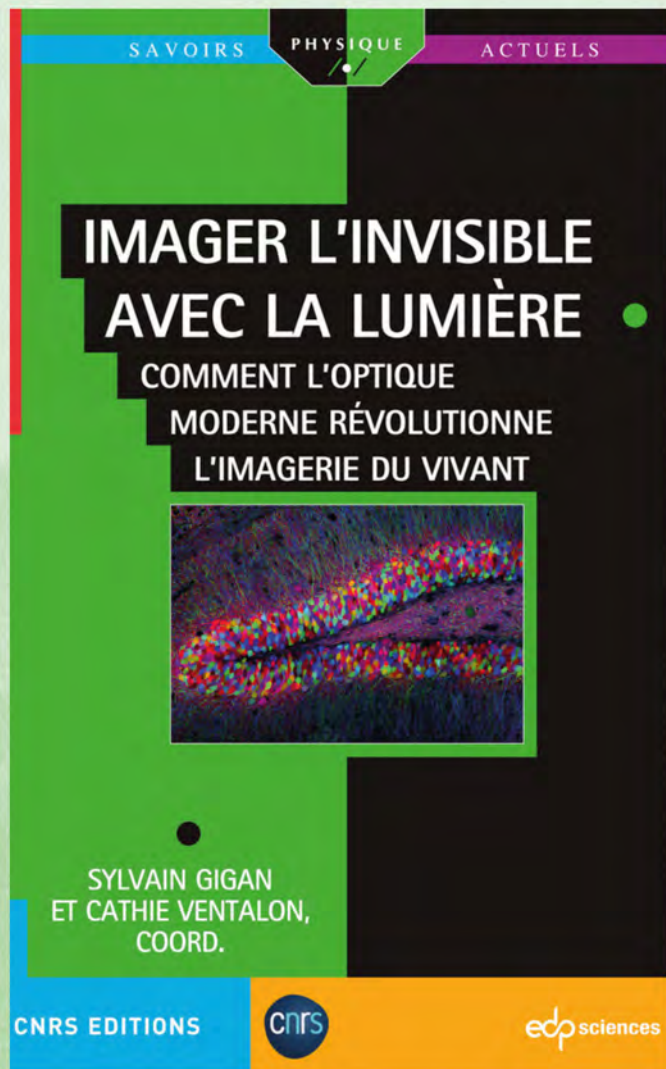
- Technologies photoniques robotisées pour la fabrication agile : VLM Robotics, Amplitude, ALPhANOV et le laboratoire IMS de l'Université de Bordeaux,
- Solutions intégrées dans des transparents aéronautiques : Saint-Gobain, Cisteme et Photonis
- DOREDO, système radar compact et léger intégrable sur drone : Cisteme



* Lancée en 2017 par le pôle ALPHA-RLH avec le soutien de la Région Nouvelle-Aquitaine, SAPHyR vise à développer une filière basée sur des solutions photoniques et hyperfréquences pour l'aéronautique.

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.



Projet EyeCrops : imagerie hyperspectrale et agriculture

Financé par Lannion-Trégor Communauté, la Région Bretagne et les partenaires du projet, Photon Lines, VFI SYSTEM, et Photonics Bretagne, le projet EyeCrops a pour objectif de développer en trois ans un instrument d'aide à la décision portable et autonome basé sur l'imagerie hyperspectrale. Telle une scanette plutôt légère (maximum 3kg), cet outil pourrait suivre en temps réel les cultures végétales soumises à des stress abiotiques. De quoi connaître facilement et instantanément l'état de la plante et ses besoins pour une agriculture plus précise et sobre. En phase opérationnelle depuis le 26 juin, des premiers tests encourageants ont été effectués par notre partenaire agrophotonique, Arvalis-Institut du végétal.

Cailbas et Astrolight lancent une mission satellitaire

Cailabs et Astrolight ont conclu un accord pour le lancement d'une mission satellitaire hébergeant le terminal de communication laser Espace-Terre ATLAS-1 d'Astrolight. L'objectif commun de la mission est d'établir des liaisons descendantes de communication laser pour démontrer les capacités de pointage, d'acquisition et de suivi à des débits de données de l'ordre du gigabit par seconde entre ATLAS-1, fabriqué par Astrolight, et la station-sol optique de Cailabs.

AGENDA

■ Conférences PLI
27-28 septembre, Rennes

■ Photonics PhD Days
24-26 janvier 2024, Lannion

Photonics Bretagne et 22 de ses adhérents à Laser World of Photonics



Bilan très positif de cette édition 2023 ! Le Laser World of Photonics à Munich, salon et congrès incontournable mettant en lumière les innovations en matière de composants, systèmes et applications photoniques, a regroupé plus de 1300 exposants et attiré 40000 visiteurs. Photonics Bretagne a retrouvé avec grand plaisir toute la communauté photonique, et en particulier 22 de ses adhérents qui y exposaient également, soit sur le Pavillon France - ALPHA-RLH, ALPHANOV, KERDRY/HEF Photonics, Idil Fibres Optiques, Le Verre Fluoré, Leukos, Luzilight, Silentsys – soit par ailleurs sur le salon - Amplitude Laser, BKtel Photonics, Cailabs, Exail, Iriosome Solutions, Lumibird, OptoSigma, Oxsius, SEDI-ATI Fibres Optiques, SOMOS, Thales, TOPTICA Photonics, Aixemtec, Laser Components. De la start-up au groupe désormais international, du micro-usinage au fabricant de systèmes photoniques sur-mesure, la quasi-intégralité du spectre des activités et applications photoniques y était représentée. Des échanges donc fortement intéressants, y compris dans le cadre des visites liées au projet européen Photonics4Industry ou lors du cocktail du Pavillon France aux côtés de nos partenaires (Business France, Photonics21, Photonics France, ALPHA-RLH, Minalogic, Pôle OPTITEC, Hub Optics & Photonics Systematic). Photonics Bretagne a en outre saisi l'opportunité de présenter un poster "All-solid VLMA Yb-Doped Single-Mode PM Fiber with 10dB/m Absorption for High Power Compact Laser Application". Celui-ci a su mettre en avant dans une configuration laser la nouvelle fibre Yb VLMA développée par notre plateforme technologique dans le cadre du projet PSCP 4F. On vous donne d'ores et déjà rendez-vous du 24 au 27 juin 2025 pour la prochaine édition !

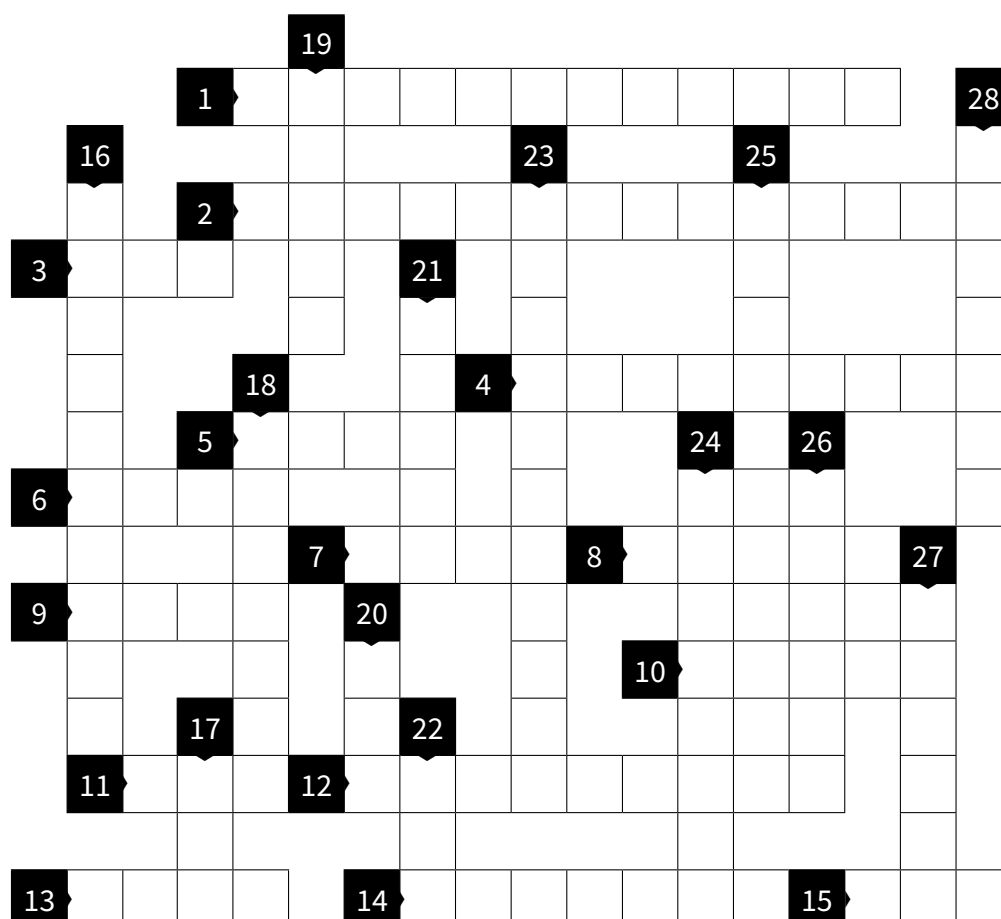
CRISTALENS : UN SAVOIR-FAIRE BRETON À L'ELYSÉE

Cristalens, fabricant breton d'implants ophtalmologiques dédiés à la chirurgie de la cataracte et à la chirurgie réfractive, a été sélectionné parmi les 2452 candidatures pour faire partie des exposants lors de la Grande Exposition du Fabriqué en France, au Palais de l'Elysée, début juillet. 125 produits issus de tous les départements et territoires de métropole et d'Outre-mer ont illustré la grande richesse des savoir-faire français, dont l'Artis SYMBIOSE®, qui permet post-chirurgie d'accommoder sa vision de près comme de loin.

MOTS CROISÉS

SUR LE THÈME DE LA SPECTROSCOPIE OPTIQUE

Par Philippe ADAM



SOLUTION SUR
PHOTONIQUES.COM



- | | | | |
|----|--|----|---|
| 1 | Fonction modélisant une raie spectrale | 16 | A découvert les raies d'absorption dans le spectre solaire |
| 2 | Appareil sélectionnant une bande étroite | 17 | Spectroscopie très utilisée en médecine pour faire des images |
| 3 | Résonance Magnétique Nucléaire | 18 | Mathématicien et physicien qui ne craignait pas la chaleur et n'avait pas de problème avec... ses sinus ! |
| 4 | Inventeur d'un interféromètre, prix Nobel 1907 | 19 | Gaz dont la spectrométrie est importante pour la qualité de l'air |
| 5 | Largeur à mi-hauteur d'une raie spectrale | 20 | Résonance Paramagnétique Electronique |
| 6 | Caractéristique des noyaux en limite de stabilité nucléaire | 21 | Technique de spectrométrie nucléaire |
| 7 | Oscillations dans l'occupation des états d'un système à deux niveaux | 22 | La bleue a éclairé le prix Nobel de Physique en 2014 |
| 8 | Responsable d'un élargissement de raie | 23 | Raies spectrales qui... jouent de la musique ! |
| 9 | Spectromètre à Transformée de Fourier | 24 | Historiquement la première spectroscopie |
| 10 | Spectromètre... qui pèse lourd ! | 25 | Inventeur d'un technique spectroscopique d'analyse des surfaces |
| 11 | Bande spectrale proche infrarouge | 26 | Couverture spectrale sur The Dark Side of the Moon ! |
| 12 | Dans cette spectroscopie, on observe la fréquence qu'on a émise | 27 | Effet de levée de dégénérescence dans un champ magnétique |
| 13 | Décalage ou déplacement spectral dans l'atome d'hydrogène | 28 | Il a su graver les échelons pour gravir les phares |
| 14 | Effet pour contrôler la vitesse ! | | |
| 15 | Diffusion de Neutron Inélastique | | |

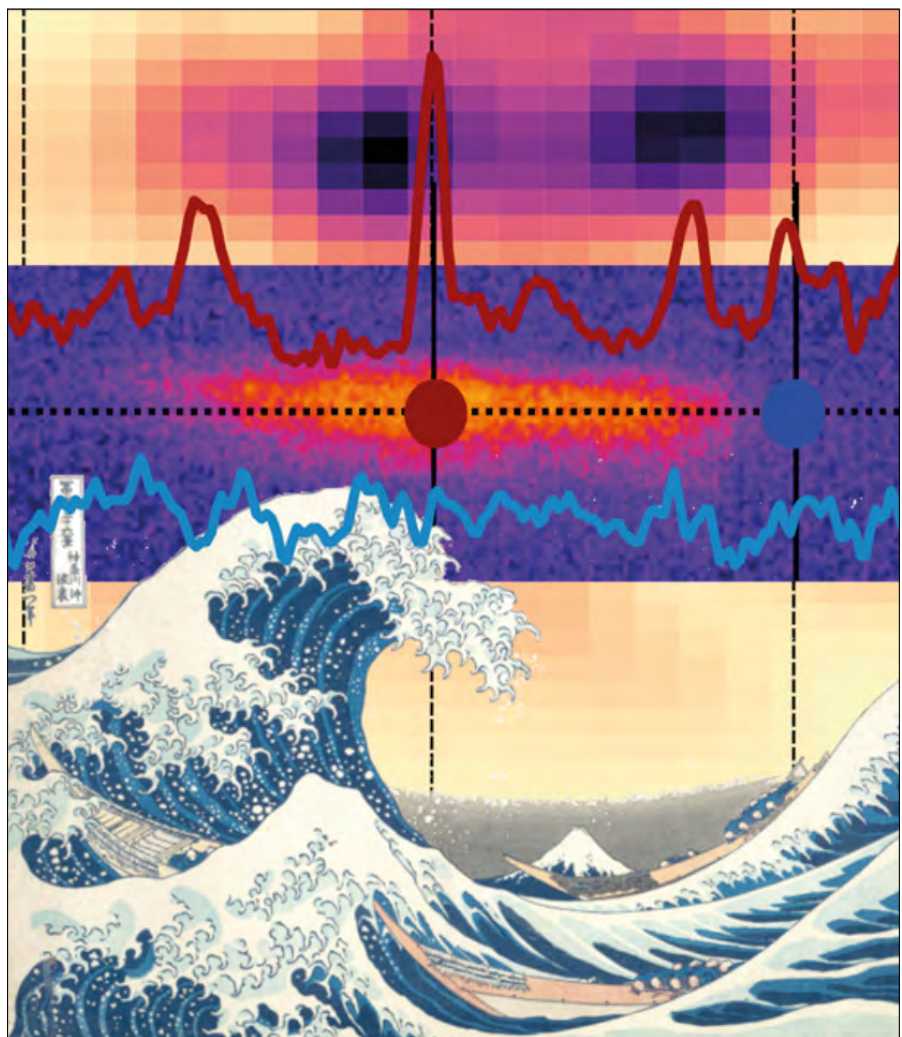
Prévision d'événements extrêmes à l'aide d'informations partielles dans un microlaser spatio-temporellement chaotique

Les événements extrêmes sont des phénomènes rares et intenses rencontrés dans une variété de situations se produisant en hydrodynamique (ondes océaniques scélérates), sciences de la terre (tremblements de terre, éruptions volcaniques, inondations), finance (krachs boursiers, bulles), biologie (crises d'épilepsie) et sciences sociales (vagues de criminalité, migrations massives).

Bien que l'origine de ces phénomènes puisse être très différente, il est important de pouvoir comprendre les mécanismes sous-jacents afin d'essayer de les prévoir, car ils peuvent avoir des conséquences dramatiques.

Parce que ces événements sont rares par définition, la photonique est devenue une bonne plateforme pour les étudier grâce aux échelles de temps courtes qu'on peut y trouver, permettant d'enregistrer un grand nombre de tels événements et d'avoir des statistiques fiables en peu de temps, le tout dans une expérience de laboratoire. De plus, la flexibilité des matériaux et des systèmes utilisés en optique peut couvrir de nombreuses situations physiques différentes.

Dans une précédente étude, un groupe de recherche regroupant le C2N, du PhLAM et de l'Université du Chili avaient montré que des événements extrêmes pouvaient émerger suite à l'apparition de chaos spatio-temporel, qui est un type de dynamique complexe que l'on retrouve dans les systèmes évoluant dans l'espace et dans le temps mais que l'on peut décrire avec un modèle déterministe. Plus récemment, en utilisant une combinaison de techniques de prévision « model-free », utilisant l'apprentissage automatique, et de mesures issues de la théorie de l'information, ils ont pu montrer qu'il est possible de prévoir à l'avance et avec une précision satisfaisante l'occurrence d'événements extrêmes dans ce système expérimental en utilisant une information non-locale, c'est-à-dire en utilisant des



enregistrements temporels issus d'un lieu différent de celui de l'événement extrême. Cette démonstration se distingue d'autres travaux récents par l'utilisation de données expérimentales partiellement connues (seulement une partie de l'information est disponible à la fois), une situation

souvent rencontrée dans les systèmes naturels et expérimentaux. ●

POUR EN SAVOIR PLUS

V. A. Pammi, M. G. Clerc, S. Coulibaly, and S. Barbay, « Extreme Events Prediction from Nonlocal Partial Information in a Spatiotemporally Chaotic Microcavity Laser », *Phys. Rev. Lett.* **130**, 223801 (2023).

Les lasers pour un backbone internet par satellite

Un consortium regroupant des scientifiques de l'ETH Zurich, de Thales Alenia Space Suisse, de l'ONERA DOTA et de Polariton Technologies AG a récemment établi des communications optiques par laser de plusieurs dizaines de To par seconde entre le Jungfraujoeh (un sommet alpin suisse) et la ville de Berne séparés de 53 km.

Le backbone de l'internet est constitué d'un dense réseau de câbles à fibres optiques, chacun transportant jusqu'à plus de 100 To de données par seconde (1 To = 10^{12} signaux numériques 1/0) entre les nœuds du réseau. Les connexions entre les continents ont lieu *via* des réseaux en haute mer - ce qui représente une énorme dépense : un seul câble à travers l'Atlantique nécessite un investissement de centaines de millions de dollars. TeleGeography, une société de conseil spécialisée, a annoncé qu'il existe actuellement 530 câbles sous-marins actifs - et ce nombre est en augmentation. Dans la perspective de diminuer cette dépense, et dans le cadre d'un projet européen Horizon 2020, les scientifiques ont établi une liaison de communication optique lors d'un test réussi entre le sommet alpin du Jungfraujoeh et la ville suisse de Berne et ont réalisé une transmission de données à haut débit sur une distance libre de 53 km.

Les connexions internet par satellite sont aujourd'hui bien connues. L'exemple le plus illustratif est le réseau de Starlink composé de plus de 2 000 satellites en orbite rapprochée de la Terre qui fournit un accès Internet à pratiquement tous les coins du monde. Cependant, la transmission de données entre les satellites et les stations terrestres utilise des technologies radio.

Les systèmes optiques fonctionnant dans la gamme de l'infrarouge peuvent transporter plus d'informations par unité de temps. Pour atteindre les débits de données les



Illustration: © ETH Zurich / Enea Ingellis

plus élevés possibles, le laser est modulé de manière à ce qu'un récepteur puisse détecter différents états codés sur un seul symbole. Cela signifie que chaque symbole transmet plus d'un bit d'information. En pratique, cela implique différentes amplitudes et angles de phase de l'onde lumineuse. Chaque combinaison d'angle de phase et d'amplitude forme alors un symbole d'information différent qui peut être encodé dans un symbole transmis. Ainsi, avec un schéma comprenant 16 états (16 QAM), chaque oscillation peut transmettre 4 bits, et avec un schéma comprenant 64 états (64 QAM), 6 bits.

La turbulence de l'air peut engendrer de fausses valeurs. Pour éviter ces erreurs, l'équipe de l'ONERA a déployé un MEMS avec une matrice

de 97 miroirs ajustables. Les déformations des miroirs corrigent le décalage de phase du faisceau sur sa surface d'intersection, le gradient actuellement mesuré étant corrigé 1 500 fois par seconde, améliorant ainsi les signaux d'un facteur d'environ 500. Des performances de 1 To par seconde ont été atteintes avec une seule longueur d'onde. Dans les futures applications, le système pourra être étendu à 40 canaux et donc à 40 To par seconde. ●

POUR EN SAVOIR PLUS

Y. Horst, B. I. Bitachon, L. Kulmer, J. Brun, T. Blatter, J. M. Conan, ... & J. Leuthold, « Tbit/s line-rate satellite feeder links enabled by coherent modulation and full-adaptive optics », *Light: Science & Applications* **12**, 153 (2023).
DOI: <https://doi.org/10.1038/s41377-023-01201-7>



Entretien avec Nicolas Forget

**De la recherche technologique en entreprise
à l'astrophotonique au CNRS**

VOTRE PARCOURS DÉMONTRE UN TRÈS FORT ATTRAIT POUR LA RECHERCHE

J'ai très tôt été attiré par les sciences, toutes disciplines confondues, mais avec une prédilection pour l'astronomie. J'avais d'ailleurs entrepris de motoriser un télescope durant mes années au collège et je m'étais essayé à l'astrophotographie avec des films hypersensibilisés... des premières expériences assez malheureuses avec le recul mais qui m'ont donné un certain goût pour la physique expérimentale. J'ai ensuite suivi une formation orientée ingénieur : bac scientifique au lycée Daudet à Nîmes, classes préparatoires au Lycée Massena à Nice, Ecole Polytechnique à Palaiseau. C'est à l'École Polytechnique que je me suis tout particulièrement intéressé aux lasers et à l'optique non linéaire, notamment grâce à trois enseignants remarquables auxquels je dois beaucoup : Alain Aspect, Antonello de Martino et Emmanuel Rosencher. Après un DEA (équivalent d'un M2 pour les lecteurs les plus jeunes), j'ai pris la décision de poursuivre en thèse de doctorat. Il s'agissait d'une thèse bipartite entre le Département Mesures Physiques (DMPH) de l'ONERA et le Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses (CNRS, École Polytechnique, CEA, Sorbonne Université). Le sujet portait sur l'amplification paramétrique optique par dérive de fréquence (OPCPA) et les travaux étaient dirigés par Patrick Georges (Laboratoire Charles Fabry).

A l'issue de cette thèse que j'ai soutenue en 2005, j'ai souhaité poursuivre en post-doctorat chez Fastlite, qui était alors une toute jeune entreprise. Pour l'anecdote, alors que je pensais signer un contrat de CDD, Fastlite m'a proposé un contrat d'ingénieur en CDI. Je suis resté finalement 17 ans chez Fastlite, avant de rejoindre très récemment le CNRS

pour mener un projet de recherche qui renoue avec ma passion d'enfance. Donc effectivement, on peut dire aujourd'hui que mon attrait pour les sciences et la recherche a forgé mon parcours, depuis le collège jusqu'à mon intégration très récente à l'Institut de Physique de Nice (INPHYNI, Université Côte d'Azur, CNRS) où je travaille aujourd'hui en tant que directeur de recherche.

QUELLES ONT ÉTÉ VOS ACTIVITÉS DANS L'ENTREPRISE ?

J'ai tout d'abord travaillé comme ingénieur de recherche avant de prendre la responsabilité de lignes de produits. En 2012 je suis devenu le directeur technique de l'entreprise. Mon premier poste consistait à trouver de nouvelles applications scientifiques et/ou industrielles au Dazzler, le produit phare de l'entreprise, alors principalement utilisé pour compenser les défauts chromatiques des chaînes lasers à impulsions courtes. Le Dazzler est un dispositif acousto-optique permettant de contrôler de manière quasi arbitraire l'amplitude et la phase des différentes composantes spectrales d'un faisceau polychromatique. La compacité et son caractère programmable font de ce composant un outil formidable pour la compression des impulsions courtes mais aussi pour la métrologie optique comme la spectroscopie (par filtrage spectral à la manière d'un monochromateur ou par double peigne de fréquences), la caractérisation spectro-temporelle ou la stabilisation de la phase enveloppe-porteuse des sources ultra-brèves. À partir de 2012, nous avons cherché à aller au-delà des sous-systèmes en proposant des sources ultra-brèves de troisième génération, c'est-à-dire principalement basées sur des processus non linéaires comme la filamentation et

l'amplification paramétrique optique. Il y a donc une forte convergence entre mes travaux de thèse et cette ligne de produits... mais avec 10 ans de décalage !

EN 2022, VOUS REJOIGNEZ LE CNRS EN TANT QUE DIRECTEUR DE RECHERCHE

J'ai en effet eu la chance de faire partie des quelques directeurs de recherche recrutés en 2022 par le CNRS par une voie autre que la promotion interne. Je souhaitais me lancer un nouveau défi personnel et scientifique mais aussi faire évoluer mon domaine de recherche. Les confinements successifs liés à la période de l'épidémie de COVID m'ont fait renouer avec l'astronomie amateur et l'astrophotographie. Avec les progrès technologiques des trente dernières années (caméras, filtres spectraux, robotisation, traitements numériques), ce qui était autrefois un tour de force est presque devenu un jeu d'enfant et l'on peut aujourd'hui prendre de magnifiques images depuis des zones péri-urbaines en dépit de la pollution lumineuse. Un second déclencheur a été la découverte des travaux sur l'interférométrie d'intensité, menés conjointement par l'Institut de Physique de Nice et le laboratoire Lagrange. Je me suis rendu compte que l'interférométrie stellaire et la métrologie des impulsions courtes partageaient de nombreux points communs et qu'il y avait là un sujet de recherche interdisciplinaire passionnant, à la croisée des chemins entre optique ultra-rapide et astronomie instrumentale. J'ai alors présenté le concours CNRS en 2022 et pris mon poste début 2023. Je profite de l'occasion pour remercier chaleureusement l'Institut de Physique pour son formidable soutien et son accueil, ainsi que l'aide précieuse de l'Université de la Côte d'Azur.

VOTRE PROJET SE SITUE DONC À L'INTERFACE ENTRE LES TECHNOLOGIES OPTIQUES ULTRARAPIDES ET L'ASTRONOMIE

Oui, le défi consiste à observer avec une très haute résolution angulaire des objets célestes : de l'ordre de quelques dizaines de microsecondes d'arc (soit $\sim 10^{-10}$ rad), ce qui permettrait de résoudre la surface d'un certain nombre d'étoiles. De telles résolutions sont impossibles à atteindre avec un télescope unique car il faudrait à ce dernier un diamètre multi-kilométrique en raison de la limite de diffraction. Une solution consiste à recourir à un réseau de « petits » télescopes séparés de plusieurs km. Au foyer de chacun des télescopes du réseau, une même étoile se présente sous la forme d'une source ponctuelle - à la turbulence près bien entendu. Cependant, les champs électriques ne sont pas identiques et l'on peut montrer (théorème de Zernike-Van Cittert) que la connaissance du degré de cohérence entre ces sources ponctuelles permet de reconstruire une image de l'étoile si le réseau est suffisamment étendu et varié. L'idée directrice de mon projet consiste à mesurer ce degré de cohérence *via* l'analyse de l'interférence entre la lumière stellaire et un train d'impulsions femtosecondes. Ces rayonnements n'étant pas cohérents, la figure d'interférence n'est pas stationnaire et il faut une détection à la fois résolue spectralement et temporellement pour la détecter. En pratique, des détecteurs et des numériseurs de plusieurs dizaines de GHz de bande passante sont nécessaires. *Via* un post-traitement numérique, on calcule ensuite le degré de cohérence des signaux pour chacune des paires de télescopes - et l'image de la source peut être finalement reconstruite. L'intérêt majeur de cette approche est qu'elle se prête bien à un déploiement à grande échelle avec un grand nombre de télescopes. De plus elle ne nécessite ni de recombinaison optique des faisceaux issus des différents télescopes, ni de stabilisation interférométrique des chemins optiques relatifs - comme c'est le cas en interférométrie optique classique.

QUELS SONT LES PRINCIPAUX DÉFIS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES À RELEVER ?

La simultanéité des mesures implique de partager une même base de temps entre

différents lieux - une problématique commune à différents pans de la recherche actuelle, comme la métrologie temps-fréquence de précision ou les télécommunications quantiques. Ici, une synchronisation à quelques picosecondes est suffisante et une liaison optique fibrée stabilisée est envisagée. Comme il est également nécessaire de compenser la différence de marche que la rotation de la terre introduit entre les télescopes, des lignes à retard rapides et de grande dynamique sont nécessaires. L'un des grands avantages à travailler avec un train d'impulsions est que sa périodicité limite *de facto* la plage de retard à compenser. Un second grand défi consiste à atteindre un rapport signal-à-bruit suffisant en un temps court (quelques ms) pour « figer » la turbulence atmosphérique, ce qui implique de disposer de sources femtosecondes à très bas bruit aux longueurs d'onde d'observation. Les plages de transparence de l'atmosphère situées dans l'infrarouge (1.45-1.8 μm , 2-2.5 μm , 3.5-4.1 μm etc.) étant particulièrement intéressantes sur le plan astrophysique, l'un des axes de travail consiste à recourir à de l'optique non linéaire pour élargir le spectre d'un laser ultra-stable dans des fibres photoniques dédiées (fibres photoniques à dispersion normale avec maintien de polarisation) et à produire l'infrarouge moyen par différence de fréquence dans des cristaux de LGS ou de PP-GaP.

Un troisième objectif est de développer des composants optiques et photoniques pour coupler efficacement la lumière issue des télescopes dans des fibres optiques monomodes afin d'en faciliter le transport jusqu'aux détecteurs, la difficulté est ici de compenser activement les effets combinés de la turbulence atmosphérique et des défauts de suivi. Cet axe de recherche s'appuie, d'une part, sur des optiques adaptatives et, d'autre part, sur des lanternes photoniques. Ces dernières sont des fibres complexes semblables à des séparatrices 1:N, avec une unique entrée multimodale (fibre multimode) et autant de sorties monomodes (fibres monomodes) que de modes spatiaux supportés par l'entrée multimodale. L'intérêt de ces lanternes est de servir à la fois de fibre de transport (fibre monomode correspondant au mode fondamental de l'entrée

multimode) et de capteur de champ proche simplifié (les autres fibres monomodes). Cette structure se prête particulièrement bien à un asservissement rapide, notamment *via* l'apprentissage machine.

SUR QUEL SITE D'OBSERVATION ALLEZ-VOUS EXPÉRIMENTER CE MONTAGE INSTRUMENTAL ?

Nous avons la chance d'avoir à proximité l'Observatoire de la Côte d'Azur et son site d'observation du plateau de Calern. Le site a hébergé des instruments précurseurs notamment en télémétrie laser et en interférométrie optique. Les télescopes jumeaux du C2PU (Centre Pédagogique Planète Univers) constituent une plateforme idéale pour une première démonstration avant d'aller, un jour peut-être, à l'ESO au Chili.

CONSERVEZ-VOUS DES LIENS AVEC LE MILIEU INDUSTRIEL ?

Oui, car il y a une convergence technologique très forte entre ce projet et les développements industriels. Si l'astrophotonique représente un marché de niche pour les industriels, les technologies développées répondent à des problématiques communes dans des domaines qui portent des projets de très forte visibilité. Les télécommunications sol-espace et la problématique de la détection de signaux faibles dans des conditions turbulentes en sont un bon exemple. Un autre exemple est la génération à très haute cadence de continuum de fréquences ultra-stable dans l'infrarouge proche et moyen, un sujet stratégique pour les marchés de la spectroscopie - par absorption ou par peignes de fréquences - mais aussi et surtout pour les sources ultra-brèves accordables. Un consortium européen réunissant trois entreprises et cinq laboratoires, parmi lesquels l'Institut de Physique de Nice, l'Institut Femto-ST et la plateforme FiberTech Lille, vient d'ailleurs de remporter un appel à projet d'envergure pour développer cette technologie dans un contexte multi-applicatif centré sur l'imagerie et le diagnostic bio-médical ainsi que la micro-structuration des verres - une synergie qui illustre bien le champ des possibles et renforcera les liens qui unissent physique fondamentale et secteur industriel. ●

Les prix de la Société Française d'Optique

Philippe ADAM

SFO - Président sortant - SFO 2, avenue Augustin Fresnel - 91127 Palaiseau cedex
home.philippe.adam@gmail.com



La SFO décerne trois prix : le Grand Prix Léon Brillouin qui consacre une carrière exceptionnelle, le Prix Fabry-de-Gramont attribué à un/e jeune ayant fait des apports scientifiques de premier plan et le Prix Arnulf-Françon récompensant une production pédagogique de haut niveau. Récemment il a été proposé que le Prix Jean Jerphagnon, complémentaire de ceux de la SFO soit labélisé par la SFO, dans le respect de sa visibilité propre.

<https://doi.org/10.1051/photon/202312116>

La Société Française d'Optique se trouve au cœur de la communauté française de l'Optique et interagit avec l'ensemble de cette communauté, depuis les activités de recherche fondamentale dans les laboratoires, jusqu'au secteur industriel en passant par le tissu des PME/PMI. La SFO s'est donné pour objectif de fédérer et animer ce réseau à très large spectre.

Un des objectifs majeurs de la SFO est de contribuer à la connaissance/reconnaissance des savoirs pour servir de relais à l'innovation et à la maturation des pépites résultant des recherches de laboratoires et des activités de R&D dans le secteur industriel.

À travers la SFO, l'optique/photonique constituent un domaine très innovant offrant des perspectives nouvelles à haute cadence. L'optique/photonique constitue une entité structurée, aux multiples composantes, ayant pour but d'assurer la diffusion et le rayonnement des activités de qualité qui sont les nôtres.

Les prix scientifiques de la SFO

Afin de soutenir les talents qui s'expriment dans ses multiples activités, la SFO a souhaité instaurer une palette de prix pour reconnaître la qualité des travaux réalisés et les faire connaître à l'ensemble de la communauté. Traditionnellement, les lauréats se voient décerner leurs récompenses lors d'une cérémonie organisée lors de notre congrès biennuel OPTIQUE – Ville.

Prix Arnulf – Françon

Le prix Arnulf-Françon a été créé à la mémoire d'Albert ARNULF et de Maurice FRANÇON (voir encadré 1). Il est décerné tous les deux ans et récompense un ouvrage destiné à l'enseignement de l'optique dans l'enseignement supérieur. Il concerne les créateurs d'outils pédagogiques destinés à la diffusion des savoirs. Tous les supports pédagogiques sont



Lauréats 2028 - Patrice Tchofo-Dinda et Pierre Mathey du laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB) pour leur ouvrage "Electromagnétisme, Ondes et propagation guidée" aux Editions Dunod
<https://icb.u-bourgogne.fr/actualites-fr/deux-chercheurs-du-laboratoire-decrochent-le-prix-arnulf-francon>

pris en compte, des plus classiques tels que les ouvrages ou supports de cours, aux plus récents utilisant les technologies numériques, tels que les MOOC (Massive Open Online Course) L'actuel prix ARNULF-FRANÇON a largement contribué à la diffusion des savoirs et des connaissances. Cette nécessité de « faire connaître » et « faire savoir » est partagée par de nombreuses sociétés savantes de par



Lauréats 2020 - Sébastien Chénais, Christophe Daussy et Sébastien Forget pour leur MOOC « La physique, vive[z] l'expérience ! » <https://www.sfoptique.org/pages/la-sfo-notre-societe-savante/prix-sfo/le-prix-arnulf-francon.html>

le monde. À travers les commissions Physique sans Frontière de la SFP et la commission Optique Sans Frontière, les contacts que la SFO entretient avec les

sociétés savantes de la physique et l'optique de langue française montre bien que ce besoin est très largement ressenti par tous. Aussi pour les prochaines occurrences, la SFO souhaite tenir compte de ce besoin de rayonnement accru pour faire évoluer dans les années à venir le prix ARNULF-FRANÇON vers la communauté francophone de l'optique-photonique. Nul doute que les activités pédagogiques développées dans la communauté francophone seront une source accrue de renouvellement et d'échanges fructueux.

Prix Fabry-de Gramont

Le Prix Fabry-de Gramont de la SFO a été instauré à la mémoire du physicien Charles FABRY (1867-1945), premier directeur général de l'Institut d'Optique, célèbre pour ses travaux sur les interférences, et de M. Armand

PRIX ARNULF - FRANCON - ASPECTS HISTORIQUES

Au cours de sa carrière, Albert ARNULF 1898 - 1984 s'est beaucoup investi dans les activités pédagogiques. En particulier, il est le fondateur de l'association des anciens élèves de l'École Supérieure d'Optique créée en 1824, l'ancêtre de l'alumni actuelle.

Les apports de Maurice Françon à l'optique sont multiples. L'article cité en référence en présente un résumé complet. Maurice Françon s'attachait particulièrement à rendre vivant ses cours magistraux. À titre personnel, pour avoir eu la chance d'assister à certains de ces cours, je me souviendrai longtemps des expérimentations réalisées en amphi sur les anneaux de Newton, projetés au plafond de l'amphi et mesurant environ... 2 mètres de diamètre : un grand souvenir !

Pour en savoir plus

ARTICLES GÉNÉRAUX WIKIPÉDIA :

https://fr.wikipedia.org/wiki/Albert_Arnulf
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Maurice_Françon](https://fr.wikipedia.org/wiki/Maurice_Fran%C3%A7on)

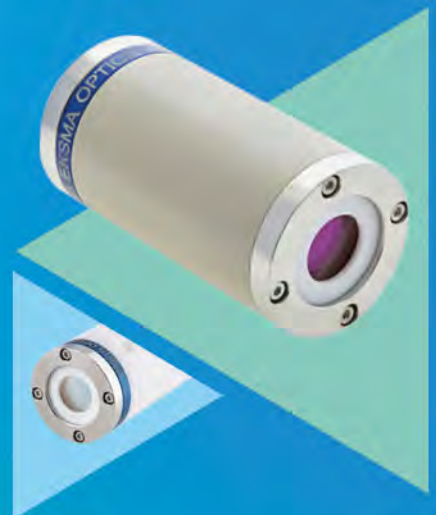
ARTICLE PHOTONIQUES :

<https://www.photoniques.com/articles/photon/pdf/2017/04/photon201787p23.pdf>

Le prix ARNULF-FRANÇON est décerné tous les deux ans.



Maurice FRANÇON
(1913 - 1996)



Represented by
ARDOP
 INDUSTRIE
 05.40.25.05.36
sales@ardop.com
www.ardop.com



www.eksmaoptics.com

de GRAMONT (1879-1962), industriel opticien, fondateur de l'Institut d'Optique.

Le prix récompense une jeune chercheuse ou un jeune chercheur de moins de 40 ans, reconnu.e internationalement, dont les travaux de recherche ont été remarqués pour leur qualité, leur originalité et leur impact potentiel. Il est attribué tous les deux ans à deux lauréat.e.s, un.e pour chaque année.

Les dossiers soumis au jury sont toujours d'excellente qualité. Ils sont évalués à l'aide des critères d'évaluation suivants :

- L'excellence scientifique des recherches effectuées.
- L'innovation des travaux et leur positionnement par rapport à l'état de l'art connu
- L'impact au niveau international
- Les publications dans les journaux scientifiques, les conférences, les coopérations....

- La prise de brevets et la valorisation éventuelle des recherches

Ce prix récompense des chercheurs et chercheuses plutôt dans leur première partie de carrière, d'où un critère d'âge, appliqué de manière assez souple néanmoins pour tenir compte des différences de trajectoire professionnelle, voire sociale que chacun peut rencontrer.

La consultation de la liste exhaustive des lauréat.e.s (<https://www.sfoptique.org/pages/la-sfo-notre-societe-savante/prix-sfo/le-prix-fabry-de-gramont.html>), démontre la qualité des chercheurs et chercheuses nominé.e.s ainsi que leur trajectoire professionnelle inscrite dans la continuité de ces travaux. Ce prix est donc très bien positionné dans le paysage et la communauté dans son ensemble reconnaît qualité et valeur aux travaux des nominés.

Grand Prix Léon Brillouin

Le Grand Prix Léon Brillouin a été instauré pour honorer la mémoire du très grand physicien Léon Brillouin (1889-1969) dont les différents travaux ont influencé profondément le développement de l'Optique. Le prix a été créé par Emmanuel ROSENCHER.

C'est le prix majeur de la Société Française d'Optique, il récompense un parcours scientifique remarquable. Il est destiné à récompenser pour l'ensemble de ses travaux une opticienne ou un opticien ayant effectué une partie importante de ses recherches en France. Il est attribué tous les deux ans sur proposition et est soutenu financièrement par la Fondation d'entreprises iXCore pour la Recherche.

Honorer la mémoire et prolonger l'œuvre de Jean Jerphagnon

Ce prix veut honorer la mémoire et prolonger l'œuvre de Jean Jerphagnon, décédé en 2005, qui mena une carrière remarquable dans le domaine de l'optique et de la photonique. Il a pour objectif de promouvoir l'innovation technologique et la diffusion de l'optique et de la photonique dans tout domaine d'application.

Ce Prix Jean Jerphagnon a été créé par François et Olivier Jerphagnon avec Jean-Luc Beylat. Le jury est présidé par Alain Aspect, Prix Nobel de Physique 2022.

Le Prix est attribué soit à un.e chercheur.se, soit à un.e ingénieur.e qui propose un projet innovant à grande valeur scientifique à fort potentiel industriel marquant une étape dans sa carrière comportant au moins un élément d'optique ou de photonique. Depuis 2021 un rapprochement s'est opéré entre le Prix Jean JERPHAGNON et la SFO. La Société Française d'Optique se situe au cœur de la communauté française de l'Optique et interagit avec l'ensemble de cette communauté, depuis les activités de recherche

LE GRAND PRIX LÉON BRILLOUIN 2021 À JEAN-PAUL POCHOLLE POUR L'ENSEMBLE DE SON ŒUVRE.



OPTIQUE Dijon 2021 -
Remise du Grand Prix Léon BRILLOUIN à
Jean-Paul POCHOLLE

Ses apports en quelques mots

- **Culture/connaissance très « large spectre » du domaine de l'optique-photonique.**
- **A su dépasser les positions arrêtées dans la communauté pour aller au-delà des préjugés et découvrir des horizons nouveaux (e.g. gyrolaser à laser solide) qui lui ont permis de transformer des « bonnes idées » en applications, contribuant ainsi à estomper les frontières entre fondamentaux et applicatifs.**
- **Grâce à son dynamisme, son talent et son sens des responsabilités, il a su trouver le juste équilibre entre l'envie de publier et la nécessité de favoriser la valorisation de ses recherches.**

<https://www.sfoptique.org/pages/la-sfo-notre-societe-savante/prix-sfo/le-grand-prix-leon-brillouin-de-la-sfo.html>

fondamentale dans les laboratoires, jusqu'au secteur industriel en passant par le tissu des PME/PMI. Dans ces activités, elle a également en charge la gestion événementielle : congrès, journées thématiques...

L'idée a alors été lancée d'accueillir le prix Jean JERPHAGNON dans le périmètre évènementiel de la SFO. Tout en faisant bénéficier le prix Jean JERPHAGNON des capacités et compétences de la SFO dans la gestion de l'évènement, ce rapprochement constitue une caisse de résonance importante dans la communauté et permet ainsi d'accroître encore le rayonnement et le prestige de ce prix.

Conclusions

La photonique offre des perspectives de ruptures potentielles, avec de fort impacts sociétaux : en médecine, dans les télécommunications, dans l'industrie automobile, pour la lutte antiterroriste, la sécurité... Par l'ensemble des récompenses attribuées



Remise du prix Jean JERPHAGNON en 2021 à Dijon
<https://www.sfoptique.org/pages/la-sfo-notre-societe-savante/prix-sfo/le-prix-jean-jerphagnon.html>

dans le cadre de ses prix, la SFO souhaite inscrire son action dans la reconnaissance des talents d'aujourd'hui, sur tout le spectre d'activités de la Photonique : toute initiative qui pourra contribuer à l'épanouissement de recherches fondamentales et appliquées, à la diffusion du savoir ou servir de relais de l'innovation et de la maturation des pépites résultant

des recherches de laboratoires et des activités de R&D dans le secteur industriel sont les bienvenues et seront soutenues avec enthousiasme. Dans le cadre de ses prix scientifiques, c'est un objectif essentiel et une tâche passionnante que la SFO s'est assignée pour assurer la promotion des savoirs et des connaissances. ●

ecoc
2023
GLASGOW

ECOC EXHIBITION 2023

Join us in Glasgow, Scotland from 2-4 October 2023

MARKET FOCUS PRODUCT FOCUS AWARDS FTTX FOCUS

Register online at ecocexhibition.com

La photonique en région Grand Est



Château du Falkenstein, commune de Philippsbourg, département de la Moselle en région Grand Est

La région Grand Est a été le berceau de plusieurs découvertes majeures de la photonique, notamment la fabrication et la caractérisation des matériaux optiques non-linéaires, les applications industrielles de l'holographie ou encore le développement de la nano-optique. Forte de cette histoire et de sa position stratégique européenne, la région Grand Est s'inscrit demain dans la création de l'Institut de la Photonique, sous la forme d'un consortium large d'acteurs publics et privés en France et au Luxembourg animé depuis un bâtiment principal à Metz.

<https://doi.org/10.1051/photon/202312020>

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.

Marc SCIAMANNA^{1,*}, Sylvain LECLER²

¹CentraleSupélec, Chaire Photonique, LMOFS, Metz, France

²INSA Strasbourg, ICube, Strasbourg, France

*marc.sciamanna@centralesupelec.fr

La « région Grand Est » est la dénomination adoptée en 2016 pour la fusion des régions Lorraine, Champagne-Ardenne et Alsace. Avec plus de 5,5 millions d'habitants, elle est la sixième région la plus peuplée de France. Son chef-lieu est Strasbourg, et les commissions permanentes du conseil régional se tiennent à Metz, troisième ville la plus peuplée de la Région Grand Est et ancienne capitale du royaume d'Austrasie. Sa position stratégique au cœur de l'Europe, bordée par la Belgique et le Luxembourg au Nord, l'Allemagne à l'Est et la Suisse au Sud, en fait un carrefour essentiel de l'activité économique française avec notamment la présence des grandes entreprises Stellantis, premier site industriel de la région avec plus de 11000 salariés, mais aussi Arcelor-Mittal qui possède à Maizières-lès-Metz en Moselle le plus grand centre de recherche européen dans les matériaux innovants, ou encore SOVAB et Schaeffler. Avec une forte tradition dans l'industrie lourde avec les filières automobiles et ferroviaires, ou encore dans les métiers d'art avec la cristallerie de Saint-Louis, Baccarat, ou encore Lalique, la région Grand Est a su également se tourner vers l'avenir et les transitions énergétiques, numériques et environnementales. Plusieurs actions de structuration regroupant établissements d'enseignement supérieur, entreprises et pouvoirs publics ont ainsi vu le jour, en cohérence avec la dynamique engagée par les pôles de compétitivité Materalial (matériaux), BioValley (santé et biologie) ou encore Hydreos (eau). Nous pouvons citer par exemple dans le domaine de l'intelligence artificielle pour l'industrie 4.0, le campus des métiers et des qualifications d'excellence CAMEX-IA basé à Metz; dans le domaine des biotechnologies, le centre européen de bio économie à Pomacle-Bazoncourt en Champagne-Ardenne; ou encore, dans le domaine de l'informatique quantique, le centre européen de technologies quantiques basé à Strasbourg. C'est dans ce contexte d'une région Grand Est tournée vers l'avenir, et forte de sa position européenne, que s'est décidée en 2022 la création du premier « Institut de Photonique » avec des missions transverses d'animation de filière, de promotion et valorisation, de formation et d'innovation en photonique - science et technologies utilisant la lumière (voir encart).

La région Grand Est : une référence de la recherche, de l'industrie et de la formation en photonique depuis 50 ans

L'histoire de la photonique s'inscrit en Région Grand Est dès les années 1980s. Au milieu des années 1980s, le Centre Lorrain d'Optique et d'Electronique des Solides (CLOES) à Metz en Lorraine réalise sous l'impulsion de son directeur Prof. Constantin Carabatos parmi les premières études des propriétés électroniques et optiques des matériaux KNbO_3 et LiNbO_3 [1] qui ont permis le développement des modulateurs électro-optiques pour les télécommunications. Devenu ensuite Laboratoire Matériaux Optiques, Photonique et Systèmes (LMOPS) en 2000 et intégré depuis 1985 sur le nouvellement construit campus de Metz de CentraleSupélec, le laboratoire a également établi une reconnaissance internationale sur l'étude de la dynamique non-linéaire spatio-temporelle des systèmes optiques avec des avancées majeures sur les solitons spatiaux photoréfractifs dans les années 1990s [2] et le chaos optique dans les années 2000s [3]. Les interactions de solitons permettent de réaliser des guides d'onde reconfigurables et le chaos optique est aujourd'hui exploité pour améliorer la résolution des LIDARs et pour la cryptographie. En 2016, CentraleSupélec installe au sein du LMOPS la « Chaire Photonique », la première chaire de photonique en France. La Chaire Photonique porte le projet de création du premier Institut de Photonique en France, sous la forme d'un consortium large d'acteurs publics et privés de la photonique en région Grand Est. Découvert en 1947, avant même l'invention du laser, le principe de l'holographie se traduit dans les années 1980s en France par des applications industrielles portées par l'Institut Franco-Allemand Saint-Louis (ISL) en Alsace. Né en 1958 à l'initiative de la France et de l'Allemagne, l'ISL développe alors sous l'impulsion de Paul Smigielski l'utilisation de l'holographie interférométrique [4] pour détecter les très faibles déplacements d'objets, et réalise les premières séquences de cinéma holographique. En 1986, Paul Smigielski crée Holo3 qui développe à Saint-Louis la métrologie optique et s'installe également à Illkirch pour y créer une entité dédiée à la réalité virtuelle. A l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, aujourd'hui Université de Strasbourg, Patrick Meyrueis (SPIE Award President 2023) alors nommé professeur assistant crée en 1981 la première équipe de recherche en photonique et donne naissance en 1987 au premier laboratoire des systèmes photoniques (LSP) devenu partie intégrante d'ICube en 2013 (laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie). Spécialiste de l'holographie et de l'optique diffractive, il installe à Strasbourg la première conférence internationale sur l'holographie en 1978 et jouera un rôle essentiel dans l'installation à Strasbourg du 2^e plus grand congrès européen de Photonique, SPIE



Laboratoire d'interférométrie optique, d'holographie et d'imagerie optique (bunker) constitué d'un bloc de béton de plusieurs centaines de tonnes reposant sur 64 ressorts et amortisseurs (ICube, Université de Strasbourg et CNRS).

Photonics Europe. En 1987 naît par ailleurs à Strasbourg l'IPCMS (Institut de Physique et Chimie des Matériaux de Strasbourg) de la fusion de plusieurs laboratoires actifs en physique du solide. Très rapidement, une équipe dédiée à l'optique ultra-rapide se crée, notamment avec l'appui de Jean-Yves Bigot, revenu depuis peu de son séjour aux Bell-Labs, U.S.A. Dans les années 1990s ●●●

**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.

jusqu'à aujourd'hui, le laboratoire développe de nombreuses recherches sur l'utilisation de lasers ultra-rapides, générant des impulsions courtes de quelques femtosecondes, pour modifier l'aimantation de matériaux minces ferromagnétiques [5]. Cette activité sur l'optique ultra-rapide est par ailleurs en résonance avec les recherches menées depuis les années 2000s sur le retournement d'aimantation par lasers ultra-rapides au Laboratoire de Physique des Matériaux devenu depuis Institut Jean Lamour (Université de Lorraine et CNRS) à Nancy. Le contrôle de l'aimantation par laser est une technique essentielle pour le développement de la spintronique. Toujours en Alsace, à la fin des années 1990s, l'Institut des Sciences des Matériaux de Mulhouse (IS2M) (Université de Haute-Alsace et CNRS) s'installe dans ses nouveaux locaux et développe de nombreuses plateformes de caractérisation optique des matériaux intégrant la spectroscopie FTIR ou Raman, la microscopie à rayons X et à force atomique. En Champagne-Ardenne, la création de la nouvelle Université de Technologie de Troyes (UTT) en 1994 s'accompagne la même année de la création du Laboratoire de nanotechnologies par le Professeur Pascal Royer. Ce laboratoire devenu ensuite L2n (Lumière, nano matériaux et nanotechnologies, UTT et CNRS) est aujourd'hui une référence internationale sur l'étude de l'interaction lumière-matière à l'échelle nano-métrique.

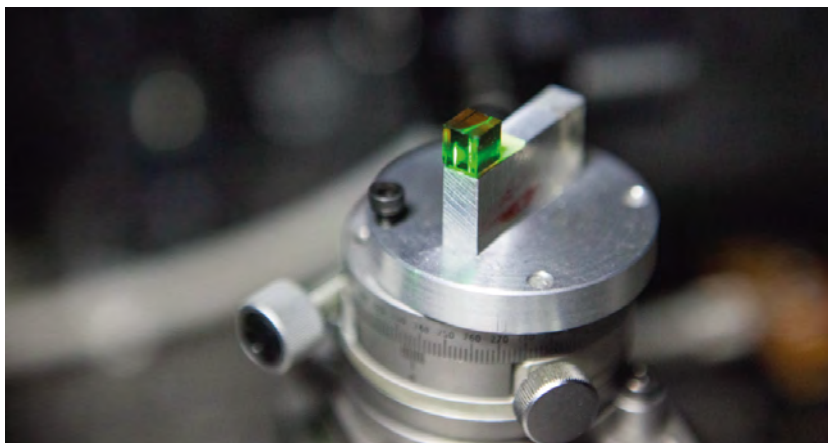
Ce terreau fertile de nouvelles connaissances en photonique a permis l'installation en Grand Est de plusieurs

fleurons industriels de la photonique en France. Aujourd'hui leader mondial des verres optiques, l'entreprise Essilor a créé les premiers verres progressifs en 1959 depuis son site de Ligny en Barrois, dans la Meuse, révolutionnant ainsi l'optique moderne. Autre exemple: installée à Messein, en Meurthe-et-Moselle, depuis plus de 30 ans, Cristal Laser est aujourd'hui une entreprise leader européen dans la fabrication de cristaux pour la photonique non-linéaire. Ces cristaux de KTP ou LBO aux propriétés optiques remarquables sont indispensables au fonctionnement de nombreux lasers pour les secteurs de la santé, de l'industrie, de la défense mais aussi de l'exploration spatiale. Pour preuve l'installation des cristaux de Cristal Laser dans les rovers de Curiosity et Persévérance envoyés sur Mars. Depuis plus de 30 ans, IREPA LASER développe quant à elle depuis son site en Alsace des technologies lasers de puissance jusqu'à 10kW pour la fabrication additive de pièces métalliques pouvant aller jusqu'à 3 m d'envergure, mais aussi le soudage et la fonctionnalisation de surface par micro-texturation laser avec désormais un Labcom, LaserSurf avec ICube, et. Citée précédemment, Holo3 est un centre d'innovation et de recherche (CIR) basé à Saint-Louis qui propose des services aux entreprises pour appliquer les technologies optiques à la métrologie. Un nouveau département dédié à la réalité virtuelle s'est depuis développé à Illkirch. Basée à Maxéville depuis plus de 70 ans, l'entreprise Éclairage Technique (ECLATEC) a su faire évoluer ses activités pour devenir un des leaders européens de



VERS UN « INSTITUT DE PHOTONIQUE »

Annoncé en 2022, l'Institut de Photonique sera un consortium large d'acteurs publics et privés de la photonique porté par CentraleSupélec. Un premier accord cadre a été signé en 2022 avec les partenaires académiques Université de Lorraine, Université de Technologie de Troyes, Université de Strasbourg, INSA Strasbourg, Université de Haute Alsace, Université du Luxembourg; les partenaires entreprises GDI Simulation et IREPA Laser; ainsi que la SATT Sayens et l'agence d'innovation Grand E-nov+. L'Institut de Photonique bénéficiera d'un nouvel espace immobilier de 2000 m² sur le campus de Metz de CentraleSupélec, qui servira de lieu central pour les échanges entre les acteurs de la photonique et pour la démonstration des innovations développées en Région Grand Est. Les missions principales de l'Institut de Photonique seront de développer les coopérations en recherche et en innovation entre les acteurs, de renforcer la visibilité et l'attractivité de la photonique, de développer de nouvelles formations spécialisées en photonique et de contribuer, par des actions pédagogiques innovantes, à une meilleure prise en compte des technologies et en particulier de la photonique dans le programme de formation en collèges et en lycées. La recherche collaborative menée au sein de l'Institut de Photonique bénéficiera de l'expertise reconnue notamment dans l'optique non-linéaire, les télécoms optiques, la mesure et l'instrumentation laser, l'optique ultra-rapide, les matériaux optiques, l'optique bio-médicale, les technologies quantiques.

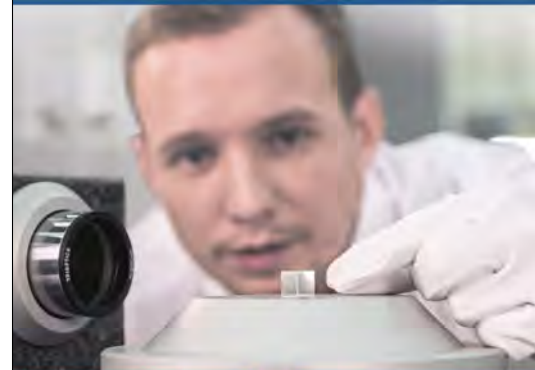


Cristal photoréfractif. La lumière en pénétrant dans le cristal modifie l'indice de réfraction, permettant la création de guides d'ondes photo-induits reconfigurables (LMOPS, CentraleSupélec et Université de Lorraine).

l'éclairage public intégrant des LEDs et des mats conçus en coopération avec les plus grands designers et proposant une solide expertise en photométrie. Nous pouvons citer également le centre européen de recherches et de formation aux arts verriers (CERFAV). Ce centre de recherche privé installé depuis 1991 à Vannes-le-Châtel, est un centre de référence international pour l'étude des propriétés optiques, thermiques, et mécanique du verre; qui propose ses services de recherche et développement aux plus grandes entreprises du domaine de l'artisanat, mais aussi de l'emballage, de la santé ou encore de l'électronique. On pourrait encore citer Osram dans le domaine de l'éclairage, Merck en biophotonique, et de nombreuses spin-offs prometteuses comme Redberry dans la détection de micro-organisme, Optiive en réalité augmentée, Poladerme en détection de lésion de la peau, MicroOmix ou PhaseLab dans la photo-analyse rapide de molécule biologique.

La Région Grand Est a également été pionnière dans la formation des ingénieurs et masters spécialisés en photonique. La création du campus de Metz de Supélec en 1985, devenu depuis 2015 CentraleSupélec, s'accompagne immédiatement de la création d'une spécialisation ingénieur en « optoélectronique et communication (OEC) » devenue aujourd'hui « photonique et ingénierie des nano-systèmes (PSY) ». Cette formation adossée à un master de physique de l'Université Paul Verlaine de Metz, aujourd'hui Université de Lorraine, aura permis de diplômer plus de 700 ingénieurs et masters spécialisés en photonique depuis 35 ans. En 2018, dans le contexte de la création de la chaire photonique à CentraleSupélec, l'établissement messin et UTT ouvrent un nouveau parcours « photonique » pour les élèves ingénieurs diplômés à l'UTT au sein de la branche « matériaux, technologie et économie » (MTE). L'UTT et l'Université de Reims Champagne-Ardenne (URCA) proposent par ailleurs un Master en Nano-Optique et Nanophotonique (NANO-PHOT) qui s'inscrit par ailleurs dans le programme d'Ecole Européenne de Recherche (EUR) Graduate School NANO-PHOT afin de préparer au mieux les étudiants masters et doctorants aux métiers exploitant les nanotechnologies. Créée en 1970 à l'initiative du département de Physique de l'Université Louis Pasteur, l'Ecole d'ingénieurs physiciens de Strasbourg devenue en 1981 école nationale supérieure de physique de Strasbourg et en 2012 Telecom Physique Strasbourg (TPS) développe les premiers enseignements en photonique. Aujourd'hui le master IRIV (imagerie, robotique, ingénierie pour le vivant) co-accrédité avec l'INSA Strasbourg propose une dominante « physique et nano photonique » avec un parcours M2 « photonique pour les nano sciences et le vivant » qui forme chaque année une vingtaine ● ● ●

Instrumentation de test optique



Mesure de la plupart des paramètres optiques

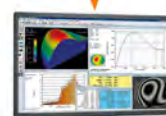
FTM, EFL, BFL, centrage, alignement front d'onde

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

d'étudiants. L'école universitaire de recherche (EUR) Q-MAT (quantum science and nanomaterials) forme les étudiants à la connaissance des propriétés quantiques de la matière pour les applications notamment liées à l'informatique et aux télécommunications quantiques et la graduate school de l'ITI HealthTech aux technologies pour la santé. En 2022 la Région Grand Est, et les collectivités Eurométropole de Metz et Département de la Moselle co-financent le projet « PHOTONIQUE 4.0 » qui permet aux trois établissements CentraleSupélec, UTT, Université de Strasbourg de créer le premier parcours de formation en photonique mutualisé et bénéficiant des meilleures technologies d'enseignement à distance sur trois sites universitaires. Des séminaires, tables rondes et visites permettent à tous les étudiants d'explorer la richesse de l'enseignement et de la recherche en photonique en Grand Est. A noter également le BTS systèmes photoniques proposé par le Lycée Jean Mermoz de Saint-Louis qui prépare des futurs techniciens à la conception et au développement des instruments d'optique.

Une nouvelle dynamique pour la photonique : de la chaire Photonique à l'Institut de Photonique

Forts de leurs contributions historiques à la photonique en France, et conscients des enjeux majeurs du développement de la photonique pour engager les nécessaires transitions numériques, énergétiques et environnementales, les acteurs de la photonique en Région Grand Est se sont engagés dans une dynamique de coopération portant à la création prochaine de l'Institut de Photonique. La proposition de créer un Institut de Photonique en Région Grand Est est née en 2018 à l'initiative de la Chaire Photonique de CentraleSupélec. Déjà lors de sa création en 2017, la Chaire Photonique portait l'ambition d'accompagner la promotion et la valorisation de la photonique en France mais la visite réalisée auprès notamment du COPL au Québec a conforté l'idée selon

laquelle cette initiative trouverait toute sa force dans une large coopération d'acteurs universitaires et entreprises. A l'initiative de la Région Grand Est, de l'eurométropole de Metz et du département de la Moselle, l'initiative de création de l'Institut de Photonique a été alors accompagnée par l'agence d'innovation Grand E-nov+ dans le contexte notamment du Business Act Grand Est adopté par la Région Grand Est et l'Etat en 2020. Un premier accord-cadre de coopération est signé en 2022 par une dizaine de partenaires académiques, entreprises et acteurs de l'accompagnement à l'innovation. À l'horizon 2026 un espace de 2000m² environ sur le campus de Metz de CentraleSupélec permettra d'accueillir une vitrine technologique de la photonique en région Grand Est, mais aussi d'y tenir des événements dédiés pour les entreprises, chercheurs et le grand public.

L'Institut de Photonique sera doté d'une gouvernance agile permettant de développer quatre missions essentielles : l'animation et la coordination d'un réseau d'acteurs publics et privés, le développement d'une recherche d'excellence et de l'innovation notamment dans les domaines industriels des télécommunications, de la mesure, de l'imagerie médicale, des technologies quantiques, et de la sécurité de l'information ; le développement de nouvelles formations avec notamment comme ambition de nouveaux diplômés d'ingénieurs et masters internationaux ; le développement de la culture scientifique, technique et industrielle autour de la photonique. La photonique n'en est qu'au début de sa structuration en France et n'est pas assez connue des jeunes collégiens et lycéens- pour lesquels il est essentiel d'encourager l'orientation vers les filières scientifiques et technologiques- mais aussi des investisseurs publics et privés. Par cet Institut de Photonique, la région Grand

Deux industries fleurons de la région Grand Est. A gauche, IREPA laser spécialiste du traitement de surface par laser. A droite, CRISTAL LASER qui développe et commercialise des cristaux notamment pour l'optique non-linéaire.

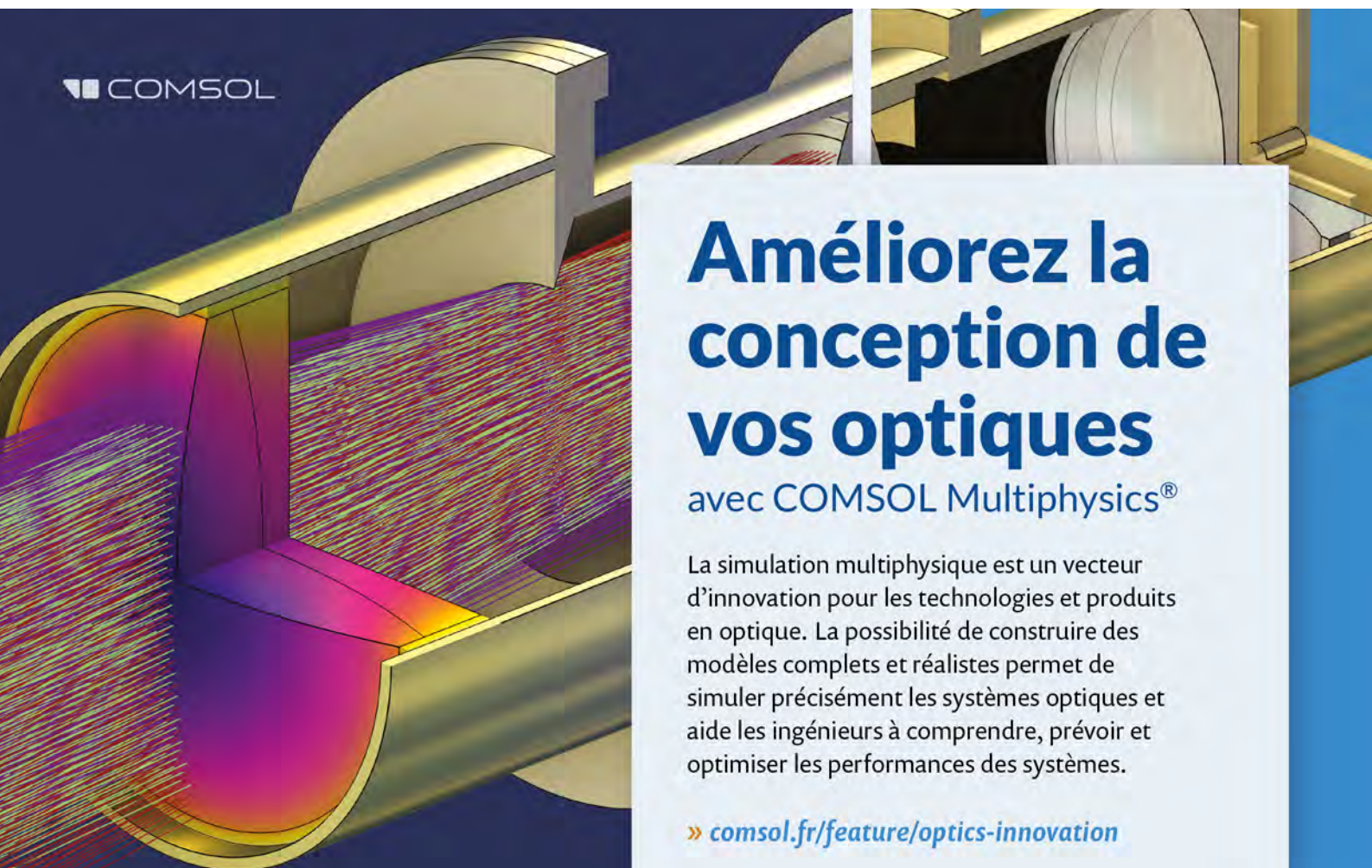


Est souhaité en coopération avec les autres pôles nationaux contribuer à cette nécessaire dynamique collective pour la photonique en France, mais aussi créer un nouvel espace de coopérations en recherche et en formation entre universités et entreprises, de découverte de la photonique pour un large public, et d'attractivité pour les entreprises qui souhaitent s'installer en Grand Est.

De façon plus générale, à l'image des initiatives comme le réseau de la French Tech développé pour les startups du numérique en France, ou comme les initiatives Quantum Flagship à l'échelle européenne ; il sera nécessaire voire essentiel pour les acteurs de la photonique de convaincre les autorités publiques de lancer une initiative coordonnée pour la photonique en France. La simple constatation physique par laquelle les systèmes photoniques multiplieront par 10 000 le nombre d'opérations de calcul réalisables dans des réseaux de neurones artificiels pour l'IA tout en augmentant par un facteur 1 000 000 la vitesse de calcul dans ces calculateurs neuro-inspirés [Optics and Photonics News, Juillet 2018], pose désormais comme urgente la nécessité d'accompagner le développement de l'innovation et des industries en photonique en France ! ●

RÉFÉRENCES

- [1] G E Kugel, F Brehat, B Wyncke, M D Fontana, G Marnier, C Carabatos-Nedelec and J Mangin, *J. Phys. C: Solid State Phys.* **21**, 5565 (1988)
- [2] N. Fressengeas, D. Wolfersberger, J. Maufoy, and G. Kugel, *Optics communications* **145**, 393 (1998)
- [3] M. Sciamanna and K. Alan Shore, *Nature Photonics* **9**, 151 (2015)
- [4] P. Smigielski, A. Hirth and C. Thery, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* **8**, 751 (1972)
- [5] J.Y. Bigot, M. Vomir, and E. Beaurepaire, *Nature Physics* **5**, 515 (2009)
- [6] M. Ahlheim *et al.*, *Science* **271**, 335 (1996)
- [7] M. Abid *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 0511101 (2012)
- [8] A. E. Giba *et al.*, *Phys. Rev. Applied* **14**, 034017 (2020)
- [9] A. Bouhelier, R. Bachelot, G. Lerondel, S. Kostcheev, P. Royer, and G.P. Wiederrecht, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 267405 (2005)



Améliorez la conception de vos optiques
avec COMSOL Multiphysics®

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

» comsol.fr/feature/optics-innovation

« *Le Rayon Extraordinaire* »... quand la polarisation inspire l'art

Fred MURIE¹, Flavien THÉRY¹, Julien FADE^{2,3,*}

¹ Collectif Spéculaire, F-35000 Rennes, France

² Univ Rennes, CNRS, Institut FOTON – UMR 6082, F-35000 Rennes, France

³ Aix-Marseille Univ, École Centrale Méditerranée, CNRS, Institut Fresnel – UMR 7249, F-13000 Marseille, France

*julien.fade@fresnel.fr

© G. Julien / Service Culture / Univ. Rennes



Le projet de création Art & Sciences et l'exposition « *Le Rayon Extraordinaire* » visent à croiser des recherches artistiques et scientifiques autour du phénomène de polarisation de la lumière. À l'issue d'une résidence d'artistes de deux ans à l'Institut Foton (Univ. Rennes), une vingtaine d'œuvres originales proposent une expérience sensible d'une réalité d'ordinaire imperceptible à nos yeux, explorant aussi bien ses aspects fondamentaux que ses liens avec nos technologies du quotidien ou encore le vivant...

<https://doi.org/10.1051/photon/202312026>

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.

Visiter « *Le Rayon Extraordinaire* », c'est vivre une expérience sensorielle complète, à la rencontre d'une réalité physique « invisible » à nos yeux : la polarisation de la lumière. En pénétrant dans l'exposition, le spectateur se retrouve immergé dans une atmosphère obscure de laboratoire d'optique où brillent des œuvres lumineuses aux formats divers, associant principes optiques et technologies numériques, dans une esthétique de science fiction. La bande originale de l'exposition, composée pour l'occasion par le musicien Thomas Poli et diffusée dans la salle, contribue à installer un climat propice à l'immersion et à la contemplation des œuvres pour inviter les visiteurs à explorer cette dimension cachée, révélant une porosité entre les mondes réel et virtuel, naturel et artificiel. Durant sa présentation aux

Champs Libres à Rennes, de novembre 2022 à mars 2023, l'exposition « *Le Rayon Extraordinaire* » a touché un large public de près de 30 000 personnes, témoignant de l'équilibre trouvé entre une démarche artistique exigeante sur un sujet scientifique – pouvant paraître aride de prime abord – et une proposition accessible au plus grand nombre.

Ce projet est né en 2015 de la rencontre du duo d'artistes rennais Flavien Théry & Fred Murie [1] avec le chercheur Julien Fade de l'Institut Foton (Univ Rennes/CNRS) à l'occasion de l'année internationale de la lumière. Mais c'est en 2020 qu'il prend corps sous l'impulsion des Champs Libres et du Service Culturel de l'Université de Rennes à travers la coproduction d'une exposition et la mise en place d'une résidence d'artistes au sein de l'Institut Foton entre

septembre 2020 et août 2022. Pendant deux ans, les artistes se sont immergés dans le quotidien d'un laboratoire d'optique. Ils ont partagé leurs interrogations et leurs expériences avec les personnels de l'équipe de recherche dans un véritable dialogue Art & Science – conduisant même certaines pièces artistiques à être cosignées entre artistes et chercheur – sans rien concéder à une forme de « rigueur » scientifique du propos artistique. La résidence de création a pu également bénéficier des moyens techniques de l'université (électronique, mécanique, FabLab...) et profiter des richesses des collections universitaires (collections de zoologie, minéralogie et instruments scientifiques anciens) mises à leur disposition par le Service Culturel pour la conception de plusieurs pièces artistiques.

Le résultat de ce travail est une exposition d'une vingtaine d'œuvres présentées sur 400 m² et mêlant une diversité de formats plus ou moins « contemporains » : du crayonné au fusain au casque à réalité virtuelle, de la peinture à l'huile au cinéma 3D, de la sculpture en plâtre aux dispositifs numériques à double écrans à cristaux liquides... Ces derniers, conçus à partir de téléviseurs LCD modifiés, sont utilisés depuis longtemps dans les créations de Flavien Théry car ils permettent de créer l'illusion de formes animées se déployant en profondeur dans l'espace vide entre deux trames vidéos complémentaires et astucieusement affichées sur les écrans en avant et arrière plan.

Le parcours de l'exposition présente une logique à la fois chronologique et esthétique : les premières œuvres s'inspirent des concepts fondamentaux de la polarimétrie (rayons ordinaires/extraordinaires, surface des indices de Fresnel, biréfringence,...) tandis que la seconde partie de l'exposition aborde les notions de perception de cette information « cachée », liées à l'imagerie polarimétrique et la vision polarimétrique dans le règne animal. La charnière entre ces deux parties s'opère au niveau de la pièce « *Tu contemples ton âme* », où une



Figure 1. Vue d'ensemble de l'exposition « Le Rayon Extraordinaire » en salle Anita Conti des Champs Libres à Rennes, du 15 novembre 2022 au 5 mars 2023. Une vingtaine d'œuvres ou de séries ont pu être présentées à un public de près de 30 000 personnes. (© G. Julien/Service Culture/Univ Rennes)

image uniformément blanche diffusée par un écran de télévision modifié se révèle être une surface océanique mouvante et graphique, en noir et blanc, dans le reflet d'une glace noire, hommage aux polariseurs ancestraux utilisés par les opticiens des siècles passés. Servies par une scénographie d'exposition judicieuse, plusieurs œuvres se font écho l'une à l'autre,

offrant ainsi un parcours cohérent au spectateur malgré la grande diversité de formes. S'il n'est malheureusement pas possible ici de traduire fidèlement cette expérience sensorielle, ni d'explicitier l'ensemble des œuvres, nous proposons dans la suite de cet article de détailler quelques clés de lecture scientifiques et artistiques de certaines pièces de l'exposition.

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

LEDs UV

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

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

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

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

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



Figure 2. L'installation « Le Rayon extraordinaire » (a) donne l'illusion qu'un cristal de calcite colore un faisceau laser blanc incident pour former deux rayons aux couleurs complémentaires qui évoluent avec la rotation du cristal (b). Un effet de sélection polarimétrique est en réalité à l'œuvre dans ce phénomène en choisissant judicieusement les polarisations des trois lasers (RVB) combinés dans le faisceau blanc (c). (© G. Julien/Service Culture & J. Fade/Univ Rennes)

La première œuvre présentée à l'entrée de l'exposition prend la forme d'une véritable manipulation de laboratoire (Fig. 2.a). Pièce éponyme de l'exposition, elle utilise un cristal naturel massif de calcite poli pour donner à voir le phénomène de double réfraction – qui a mené à la découverte des effets de polarisation au XVI^e siècle – sous une forme originale. Le défi créatif de cette pièce a été d'exploiter ce phénomène extrêmement connu et documenté en enseignement et vulgarisation pour l'exploiter esthétiquement de façon inédite. Dans « *Le Rayon Extraordinaire* », un laser « blanc » est séparé en deux rayons aux couleurs distinctes et changeantes au gré de la rotation du minéral de calcite (Fig. 2.b). Un dispositif fumigène permet de révéler les faisceaux laser à travers un brouillard léger et fantomatique, augmentant l'impression d'étrangeté et de surnaturel de cette œuvre interactive, qui s'allume et se met en mouvement en présence de visiteurs. Le choix des matières et le soin apporté à sa réalisation rappelle le haut niveau de finition et d'esthétique des instruments scientifiques anciens, source d'inspiration pour les artistes.

La coloration des rayons à travers le cristal repose en réalité sur une « illusion » polarimétrique. Le rayon blanc incident résulte de la superposition de trois faisceaux rouge, vert et bleu, dont les polarisations linéaires sont ajustées à 120° l'une de l'autre (Fig. 2.c). En pénétrant la calcite, chacune de ces trois polarisations se retrouve projetée sur les axes propres de propagation du cristal anisotrope, avec plus ou moins d'efficacité selon l'angle entre l'axe de polarisation

incident et l'orientation des axes propres du cristal. En sortie, les deux rayons ordinaires et extraordinaires séparés lors de la propagation dans le matériau anisotrope présentent alors des couleurs complémentaires et changeantes au fur et à mesure de la rotation. En effet, il est intéressant de noter que le choix de disposer les polarisations du faisceau blanc (RVB) incident selon une symétrie d'ordre 3 implique que les colorations des faisceaux de sortie sont nécessairement complémentaires, c'est-à-dire opposées sur le cercle chromatique, sur lequel les couleurs primaires rouge, verte et bleue sont disposées à 120° les unes des autres... En revisitant une expérience plus que classique, cette œuvre d'art – ou devrait-on dire ici cette manip ? – permet de relier polarisation et colorimétrie au travers d'un phénomène visuel, saisissant et esthétique.

Le lien étroit entre polarisation et vivant fut une autre grande source d'inspiration de ce travail de résidence. En particulier, la question de la « sensibilité » polarimétrique qui sous-tend une grande part de l'exposition, et l'idée que la polarisation pouvait véhiculer un sens « caché » indiscernable aux yeux non initiés se retrouvaient naturellement dans une des plus fascinantes espèces sous-marines : la seiche, céphalopode aux propriétés optiques hors du commun. Les céphalopodes font en effet partie des animaux qui ont développé une vision sensible à ces propriétés ondulatoires de la lumière (avec certains insectes, poissons...). Si l'on sait que les abeilles exploitent les contrastes de polarisation du ciel pour s'orienter, l'utilisation de la polarisation

par les seiches est encore plus fascinante : elles s'en serviraient pour distinguer une proie (ou un prédateur) de son image réfléchi à la surface de l'eau – le miroir d'eau ayant tendance à polariser la lumière qui s'y reflète. Mais les recherches récentes sur le comportement de ces animaux fantastiques suggèrent une hypothèse encore plus incroyable : les seiches, championnes incontestées du camouflage et du mimétisme adaptatif sous-marin, pourraient avoir développé une communication intra-espèce basée sur l'émission de motifs polarisés sur leur épiderme [2]. Des cellules appelées iridophores sont à l'origine de cette polarisation par réflexion sur certains organes de la seiche (le long des bras-tentacules) tandis que les cellules chromatiques de l'épiderme (chromatophores), qui assurent l'essentiel du travail de camouflage, ne possèdent pas cette propriété.

Ce sont précisément ces signatures polarisées, rarement observées jusqu'ici, que nous nous sommes mis au défi de capter et de sublimer dans les pièces « *Les discrètes* » et « *Le secret* » de l'exposition. Accueillis au Marinarium de la station marine de Concarneau (Museum National d'Histoire Naturelle) durant une semaine de mars 2021, nous avons pu exploiter une caméra polarimétrique de dernière génération (intégrant un capteur muni d'une grille de micropolariseurs) [3] pour filmer un spécimen de seiche élevé en captivité et déceler ces motifs polarisés qui s'expriment fugacement, au gré de l'humeur de l'animal. Loin d'un travail rigoureux d'éthologie, ces captations contribuent néanmoins

à confirmer la réalité de ces signatures en lumière polarisée exprimées sur les bras de la seiche !

La restitution sous forme artistique de ce travail de collecte a longuement mûri, passant de l'idée d'un « aquarium vidéo » à une diffusion des signaux polarisés en fausses couleurs sur un dispositif à double-écrans, le second écran affichant l'image brute en niveau de gris du capteur polarimétrique (« *Les discrètes* »). Mais c'est justement la basse résolution et la trame toute particulière de ce détecteur polarimétrique à division de plan focal qui ont inspiré aux artistes le choix audacieux de restituer une image statique mais monumentale de la seiche sous la forme d'une tapisserie numérique au point d'Aubusson (Fig. 3.a), parfaitement adaptée à la granularité de l'image brute du capteur. Ce procédé nous a permis de faire effectuer le tissage au moyen de 3 fils colorés (noir, blanc, gris) auquel s'adjoint un fil métallisé doré qui vient tisser les signatures polarimétriques sur l'épiderme de la seiche (Fig. 3.b). En illuminant la tapisserie « *Le secret* » en lumière polarisée linéairement, et en exploitant la préservation de la polarisation sur une réflexion métallique (contrairement aux autres fils), le signal polarimétrique est alors révélé au spectateur lorsqu'il observe l'œuvre à travers un petit dispositif polarisant à cristaux liquides qui permet de faire « battre » ce message secret de la seiche. Ainsi, ce médium de la tapisserie s'est imposé

comme « incarnation » idéale de l'image, lui donnant une vraie présence matérielle et un certain caractère organique. Si la technique est résolument contemporaine, la référence au champ de la tapisserie inscrit le sujet dans une temporalité autre, lui conférant une dimension quasi mythologique...

Au-delà de la manifestation ou de la captation de l'information polarimétrique, la recherche Art & Science s'est également orientée vers la question de la représentation et de la visualisation de cette « dimension cachée », qui intéressait les partenaires aussi bien artistes que scientifiques. Il s'agit dans un cas comme dans l'autre de permettre de « rendre visible », ou plus facilement appréhendable, quantifiable, des phénomènes ou des notions qui restent sinon trop évanescents, théoriques ou abstraits pour pouvoir s'en faire une représentation mentale. Cette démarche exploratoire sur la représentation sensorielle et mentale de l'information polarimétrique rejoint à la fois des problématiques scientifiques réelles [4] et des champs de recherche artistiques et poétiques.

En effet, même quand l'information polarimétrique se retrouve résumée à un seul paramètre numérique scalaire – comme souvent dans beaucoup d'applications concrètes –, l'artiste ou le chercheur est à court de moyens pour la représenter, sur une image couleur, de façon sensible et quantitative à nos sens visuels limités. Parmi les solutions exploitées ●●●

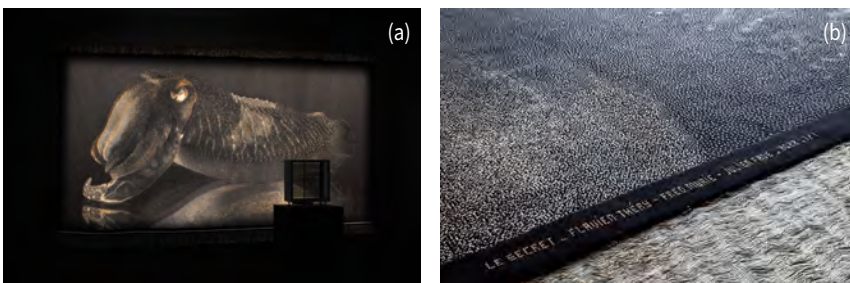


Figure 3. (a) La tapisserie numérique au point d'Aubusson « *Le secret* » présentait en très grand format le signal polarimétrique émis sur les bras de la seiche filmée au moyen d'un capteur polarimétrique. (b) Grâce au tissage (vue de détail sur la figure) réalisé en quadrichromie incluant un fil métallisé doré et à l'illumination de la tapisserie en lumière polarisée, le public pouvait observer ce signal battre à travers un dispositif polarisant à cristaux liquides placé devant l'œuvre. (© Spéculaire) ●●●

INNOVATIONS EN SPECTROMÉTRIE
COMPACTÉ | PERFORMANCES | COÛT

SPECTROMÈTRE RAMAN ULTRA COMPACT

- ▲ Gamme spectrale : 400-4500 cm^{-1}
- ▲ Résolution 7-15 cm^{-1}

NEW !



Prix de lancement 10 K€

SPECTROMÈTRE ULTRA HAUTE RÉOLUTION

- ▲ Gamme spectrale : 450-1030 nm
- ▲ Pouvoir de résolution : ~15 000
- ▲ Poids : 650 g

NEW !



Prix de lancement 12,5 K€

MINI MICROSCOPE RAMAN

- ▲ Excitation laser : 405-785 nm
- ▲ Gamme spectrale : 50-4500 cm^{-1}
- ▲ Résolution : 2-15 cm^{-1}

NEW !



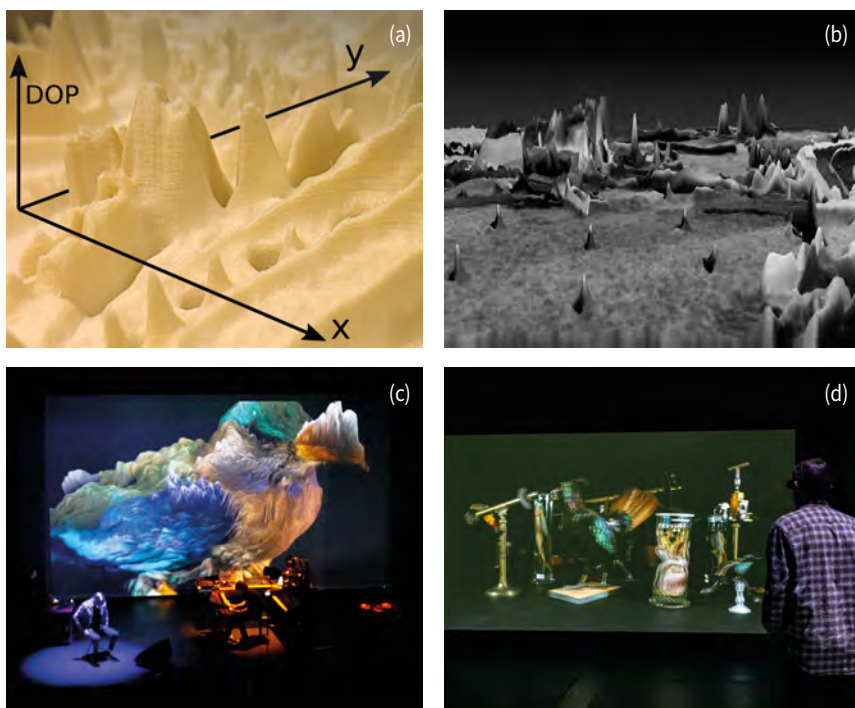


Figure 4. Plusieurs pièces de l'exposition reposent sur l'utilisation de la 3^e dimension de l'espace pour encoder une information polarimétrique scalaire (degré de polarisation, DOP) (a) : cet artifice permet de « donner à voir » cette information cachée, et révéler des paysages fantastiques, comme si l'on basculait dans une réalité alternative (b). Divers formats exploitent cette approche originale dans l'exposition : impression 3D (a), tirage photographique (b), réalité virtuelle (c) ou projection monumentale 3D à lunettes polarisantes (d). (© J. Fade/Univ Rennes, Spéculaire, G. Julien/Service Culture/Univ Rennes)

pour donner à voir le contraste de degré de polarisation (qui quantifie la façon dont l'objet imagé dépolariise – « désordonne » – plus ou moins l'état polarimétrique d'éclairement [4]), nous avons proposé d'utiliser la troisième dimension spatiale, l'« altitude » venant encoder directement le degré de polarisation (Fig. 4.a).

Cet artifice permet de révéler cette information cachée, mais offre surtout un potentiel de création et d'imagination extraordinaire, chaque image à deux dimensions se transfigurant alors sous la forme d'un « paysage » façonné par les propriétés polarimétriques des objets imagés, et dans lequel le spectateur peut s'immerger. Ces paysages polarimétriques ont été exploités dans plusieurs pièces de l'exposition, sous des formes plastiques différentes : impression 3D (Fig. 4.a), tirages photographiques (Fig. 4.b), restitution vidéo, réalité virtuelle

(Fig. 4.c) ou encore projection murale tridimensionnelle à lunettes polarisantes (Fig. 4.d). Cette dernière installation emporte le spectateur dans une mise en abyme circulaire : on donne à voir la polarisation par l'artefact d'une profondeur artificielle... elle-même rendue visible à l'œil par un dispositif technologique reposant sur... la polarisation de la lumière !

Pour conclure, si nos sens ne nous donnent accès qu'à une infime part de la réalité, les sciences, tout comme les arts, n'ont de cesse de dépasser cet environnement tangible et observable. L'exposition « *Le rayon extraordinaire* » entendait ainsi s'aventurer au-delà de notre perception pour nous dévoiler un monde qui suscite l'émerveillement et impose le respect. Au vu de la fréquentation et des retours sur l'exposition et sur les événements annexes (conférence scientifique grand public, débat art & science, performance/concert), les acteurs du projet ont le sentiment d'avoir réussi ce pari à travers une aventure humaine d'une extraordinaire richesse, au croisement de deux disciplines si différentes mais dont les démarches sont finalement si semblables. ●

Pour en savoir plus

- Site web de l'exposition <https://www.leschampslibres.fr/expositions/expositions-passees/le-rayon-extraordinaire/>
- Thomas Poli, vinyle *Le Rayon Extraordinaire*, <https://impersonalfreedom.bandcamp.com/>
- « Fred Murie & Flavien Théry, artistes spéculaires », P. Dorval, https://www.leschampslibres.fr/fileadmin/Champs_Libres/Documents/Photos/Expos/2022/Le_rayon_extraordinaire/rayonextra-articleartistesspeculaires-philipedorval.pdf
- « Regard scientifique sur *Le Rayon Extraordinaire* », J. Fade, https://www.leschampslibres.fr/fileadmin/Champs_Libres/Documents/Photos/Expos/2022/Le_rayon_extraordinaire/rayonextra-article-regardscientifiquepolarisation-julienfade.pdf
- Conférence grand public à l'Espace des Sciences de Rennes, 29/11/2022, <https://www.espace-sciences.org/conferences/la-polarisation-de-la-lumiere-du-rayon-extraordinaire-aux-applications-modernes>

RÉFÉRENCES

- [1] <https://www.speculaire.fr>
- [2] N. Shashar *et al.*, *J. of Exp. Bio.* **199**, 2077 (1996)
- [3] J. Fade *et al.*, *Photoniques* **109**, 57 (2021)
- [4] A. W. Kruse *et al.*, *Opt. Eng.* **58**, 082414 (2019)

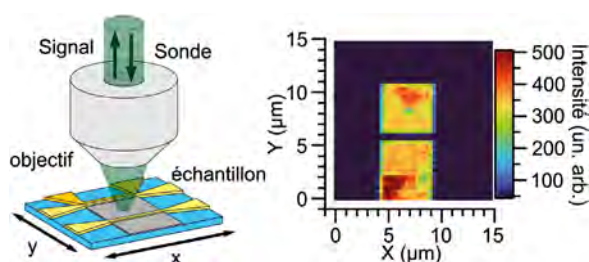
SPECTROSCOPIE ET IMAGERIE RAMAN : DES MATÉRIAUX QUANTIQUES À LA MATIÈRE VIVANTE

Yann GALLAIS¹, Alexandr ALEKHIN¹, Stéphanie DEVINEAU²

¹ Université Paris Cité / Matériaux et Phénomènes Quantiques, Paris, France

² Université Paris Cité / Biologie Fonctionnelle et Adaptative, Paris, France

*yann.gallais@u-paris.fr, alexandr.alekhin@u-paris.fr, stephanie.devineau@u-paris.fr



La spectroscopie Raman a déjà une longue histoire dans les études vibrationnelles des structures moléculaires et cristallines. Après une brève introduction historique, nous décrivons quelques développements récents de cette technique dans l'étude des matériaux quantiques comme les supraconducteurs. Nous abordons ensuite l'extension de cette technique à l'imagerie Raman confocale qui est maintenant devenue son application principale et que nous illustrons sur l'exemple des matériaux 2D et du vivant.

<https://doi.org/10.1051/photon/202312131>

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.

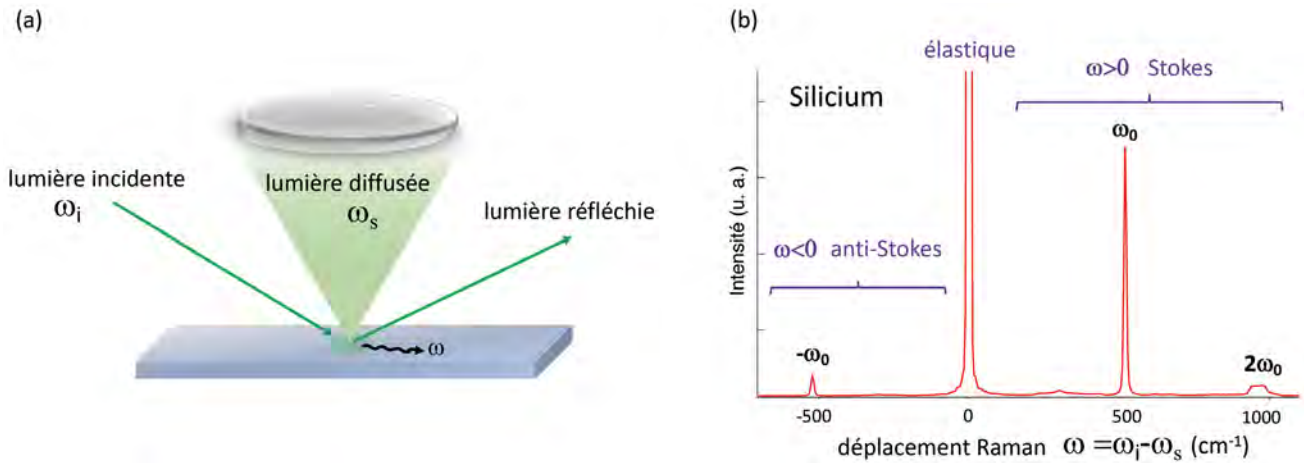
INTRODUCTION HISTORIQUE

La diffusion Raman est un processus de diffusion inélastique de la lumière découvert indépendamment en 1928 par Raman et Krishnan (en Inde) et Landsberg et Mandelstam (en URSS). Le principe de l'expérience est simple : un rayonnement incident monochromatique visible ou proche infrarouge éclaire un échantillon, la majeure partie de la lumière est réfléchie ou transmise et une partie infime est diffusée par l'échantillon. Cette diffusion peut

être élastique mais dans le cas de la diffusion Raman, elle est inélastique et on définit alors le déplacement Raman comme étant la différence d'énergie entre la lumière incidente et celle diffusée $\omega = \omega_i - \omega_s$. Le déplacement Raman généralement noté en nombre d'onde (unités cm^{-1}) correspond à une excitation de l'échantillon, le cas le plus connu étant les modes de vibrations d'une molécule ou d'un cristal (phonons). Dans le cas où le déplacement Raman est positif/négatif, on a un processus

de création/destruction d'excitations dans l'échantillon (processus Stokes et anti-Stokes (figure 1)).

Initialement la spectroscopie Raman était limitée par la faible section efficace du processus et par la nécessité de filtrer efficacement la diffusion élastique qui est généralement plusieurs ordres de grandeurs plus intense que la diffusion Raman inélastique. Avec la découverte du laser dans les années 1960 et le développement de spectromètres dispersifs multi-monochromateurs ●●●



permettant de filtrer efficacement la raie élastique, la diffusion Raman s'est progressivement imposée en chimie et en physique pour les études vibrationnelles des molécules et cristaux. La spectroscopie Raman est ainsi vite devenue un outil de caractérisation des matériaux complémentaire aux techniques de diffraction des rayons X pour identifier les phases cristallines et détecter des transitions de phases structurales [1]. Pour certaines transitions plus subtiles comme la transition paraélectrique ferroélectrique, elle a même eu un rôle pionnier dans l'étude des oxydes de type pérovskites ferroélectriques comme BaTiO_3 et PbTiO_3 . Un second pas a été franchi dans les années 1980 avec le développement des détecteurs CCD à haut rendement quantique permettant une acquisition multicanale beaucoup plus rapide des spectres par rapport aux détecteurs monocanaux comme les photomultiplicateurs utilisés précédemment.

Figure 1. (a) Principe de la diffusion Raman. (b) Spectre Raman obtenu sur le silicium cristallin montrant la présence d'un phonon optique de nombre d'onde $\omega_0 = 520 \text{ cm}^{-1}$. On notera la présence de processus Stokes à 2 phonons ($2\omega_0$).

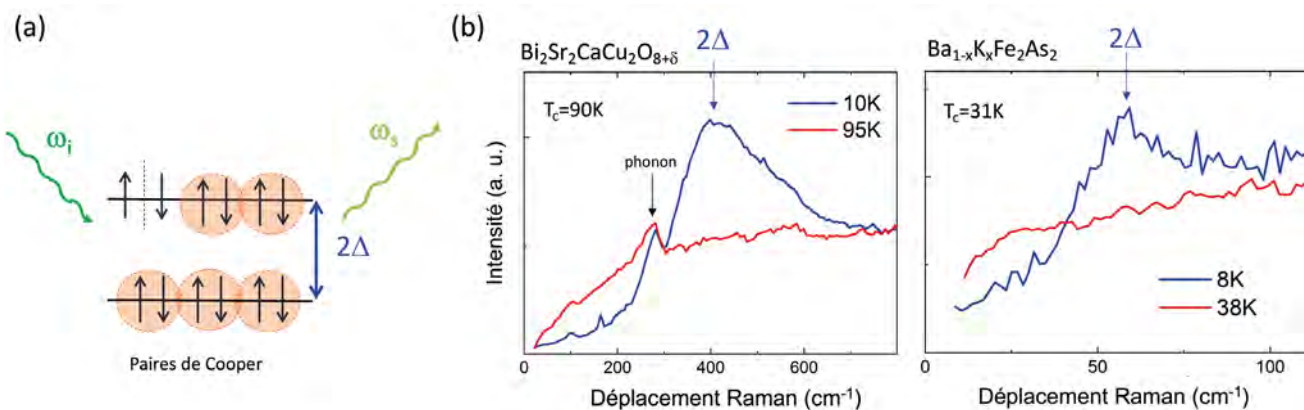
Ce développement a permis une extension majeure de l'utilisation de la spectroscopie Raman dans deux directions. La première concerne l'étude des excitations non vibrationnelles, électroniques ou magnétiques par exemple, pour lesquels les signaux étaient souvent trop faibles pour être analysés. La seconde porte sur le développement de l'imagerie Raman permettant de combiner l'information spectroscopique, par exemple fonctionnelle pour une molécule, et l'information spatiale par microscopie.

Dans la suite de cet article, nous allons illustrer avec quelques exemples ces deux avancées.

AU-DELÀ DU RAMAN VIBRATIONNEL : L'EXEMPLE DES SUPRACONDUCTEURS.

Dans les années 1980, les effets de résonance apparaissant lorsqu'une énergie de laser incident proche du gap optique du matériau, ont été mis à profit pour sonder les excitations électroniques dans les semiconducteurs dopés et dans les

Figure 2. (a) Excitation d'une paire de Cooper brisée par diffusion Raman dans un supraconducteur à l'énergie 2Δ où Δ est le gap supraconducteur. (b) Spectre Raman dans l'état supraconducteur (bleu, $T < T_c$) et dans l'état métallique (rouge, $T > T_c$) pour deux matériaux supraconducteurs à haute température critique.



hétérostructures de semiconducteurs de type III-V comme GaAs [2]. Ces études pionnières avaient démontré que la spectroscopie Raman pouvait sonder des excitations électroniques. Plus récemment ces études fondamentales ont été étendues aux matériaux métalliques pour lesquels ces effets de résonance sont faibles voire inexistantes en raison de l'absence de gap optique. Il est souvent communément admis que la diffusion Raman n'est pas observable dans les métaux. C'est en partie vrai pour les « bons » métaux comme l'or ou l'argent : la lumière incidente visible pénètre très peu dans le matériau (quelques nanomètres) et le signal déjà très faible est souvent dominé par celui de la couche d'oxyde qui se forme en surface. En revanche pour les « mauvais » métaux comme bon nombre d'oxydes par exemple, la situation est très différente : la lumière visible pénètre sur plusieurs dizaines voire centaines de nanomètres et les signaux, bien que faibles, sont facilement observables

avec l'instrumentation actuelle [3]. Du point de vue fondamental, ces mauvais métaux sont très intéressants car ils sont le siège d'ordres électroniques quantiques exotiques dus aux interactions électroniques, on parle alors de matériaux quantiques. L'exemple le plus emblématique est celui des matériaux supraconducteurs qui se comportent comme des conducteurs parfaits (leur résistance électrique est nulle) sous une température de transition T_c de l'ordre du Kelvin ou moins dans la plupart des métaux. Du point de vue microscopique l'état fondamental supraconducteur se caractérise par un appariement des électrons par paires, appelées paires de Cooper. Contrairement à un métal normal, cet état de la matière possède un gap dans son spectre d'énergie : le premier niveau d'énergie excité en énergie correspond à la brisure de paires de Cooper en deux électrons non-appariés. Cette excitation de brisure de paires de Cooper est de nature purement électronique et non vibrationnelle. Deux ●●●

Spectromètres Raman compacts – Pro-Lite

Pro-Lite propose les spectromètres de son partenaire Wasatch, qui développe des systèmes compacts hautes performances. Leur large gamme est composée de spectromètres Raman mono longueur d'ondes d'excitation (248, 405, 532, 633, 785, 830 et 1064 nm). Chaque système peut être proposé avec une source Laser et une sonde de mesure.



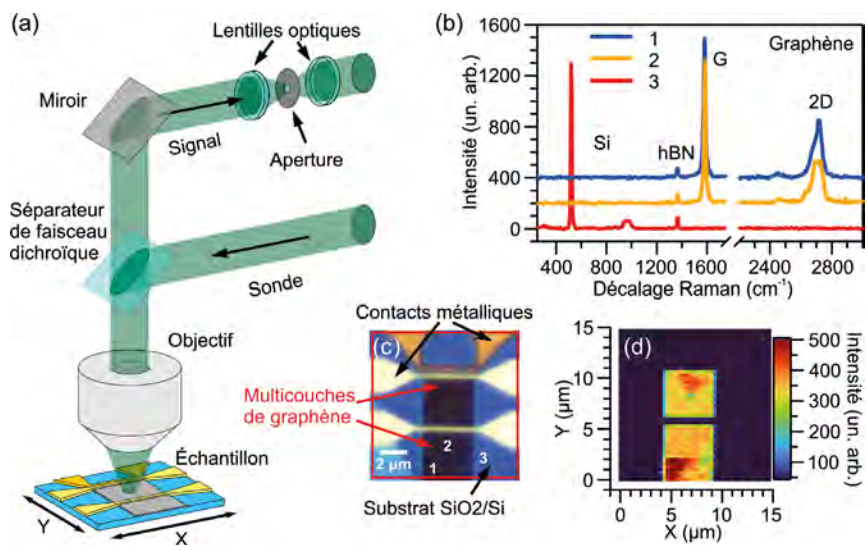
À encombrement équivalent, grâce au choix méticuleux des composants, ils sont les systèmes les plus sensibles du marché et permettent la détection de signaux faibles. Cette haute sensibilité des spectromètres repose sur 3 éléments principaux :

- Une plus grande ouverture d'entrée que la concurrence ($f/1.3$ ou $f/2$).
- Des réseaux en transmission brevetés par Wasatch.
- Des optiques en transmission qui assurent une efficacité de 93% entre l'entrée et le capteur.

Ces trois éléments permettent la collection de plus de photons et autorisent une plus grande proportion d'entre eux à rejoindre le détecteur. Par leur compacité et leur transportabilité, ils sont adaptés aux applications de recherche générale visant à minimiser des ensembles sans compromis sur la sensibilité. ●

CONTACT
 Pro-Lite Technology France
 Nicolas Marlet
 05 47 48 90 70
 nicolas.marlet@pro-lite.fr
 www.pro-lite.fr

Figure 3. (a) Principe de la microscopie Raman confocale. L'aperture installée dans le trajet du faisceau de signal supprime toutes les contributions du signal provenant des points en dehors du point focal de l'objectif, améliorant ainsi la qualité des images Raman. (b) Spectres Raman dans différentes régions d'un dispositif graphène/hBN/SiO₂ avec contacts métalliques (image optique en (c)). On notera notamment les phonons « G » et « 2D » typiques du graphène. La forme spectrale de la bande 2D sur le spectre 1 est typique d'un échantillon de graphène épais (<10 couches). Celle sur le spectre 2 correspond à un graphène bi-couche. (d) Variation spatiale de la forme de la bande 2D indiquant un échantillon globalement bi-couche mais avec 2 zones en rouge plus épaisses.



exemples de spectre Raman de supraconducteurs dits à « haute température de transition critique, T_c » sont montrés figure 2 pour l'oxyde de cuivre supraconducteur à haute température $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ($T_c = 90\text{K}$) découvert à la fin des années 1980, et pour le supraconducteur au fer $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ ($T_c = 31\text{K}$) découvert plus récemment en 2008. Dans la phase métallique ($T > T_c$) les spectres de ces deux supraconducteurs montrent un continuum d'origine électronique dû aux excitations de type électron-trou proche du niveau de Fermi. Pour $T < T_c$ le spectre Raman se transforme radicalement avec l'apparition d'un pic de paires brisées. Le déplacement Raman du pic donne directement l'« énergie de liaison » des paires de Cooper, une caractéristique essentielle de l'état supraconducteur.

IMAGERIE RAMAN : DES MATÉRIAUX 2D AU VIVANT

Parallèlement aux études spectroscopiques fines, l'amélioration de la détection en diminuant notamment drastiquement les temps d'acquisition des spectres, a permis l'essor de l'imagerie Raman. Son principe repose sur un microscope confocal standard couplé à un spectromètre visible permettant l'acquisition point par point de spectres Raman avec une résolution latérale inférieure au

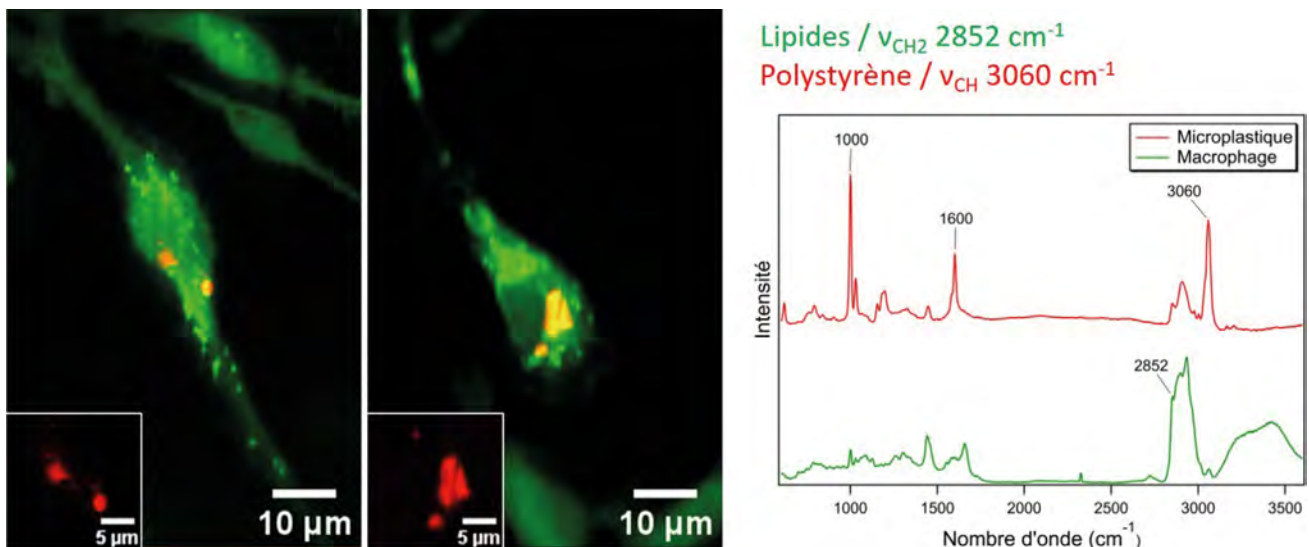
micron. On obtient ainsi une information spectroscopique, généralement vibrationnelle, sur la nature de l'échantillon qui est résolue spatialement, sans marqueur spécifique. Par rapport à d'autres techniques d'imagerie comme la microscopie de fluorescence très utilisée en biologie, l'imagerie Raman confocale présente plusieurs avantages : elle est non-invasive, et très facile à mettre en œuvre car elle ne nécessite pas de préparation de surface ou d'échantillon particulière. Elle peut également être utilisée pour l'observation *in situ* d'échantillons biologiques tels que des cellules.

En physique des matériaux, l'imagerie Raman a connu un essor considérable de son utilisation suite à la découverte du graphène, une monocouche d'atomes de carbone obtenue initialement par exfoliation mécanique. Depuis c'est tout une classe de matériaux bi-dimensionnels dits « 2D » (comme les dichalcogénures de métaux de transition ou « TMD ») qui a fait son apparition, ouvrant la voie à un nouveau type

En physique des matériaux, l'imagerie Raman a connu un essor considérable de son utilisation suite à la découverte du graphène, une monocouche d'atomes de carbone obtenue initialement par exfoliation mécanique.

de dispositifs fonctionnels basés sur l'empilement de ces matériaux 2D faiblement couplés (les hétérostructures de « van der Waals »). Dans le cas du graphène, la forme spectrale de la bande de double phonon intracouche dite « 2D » à 2700 cm^{-1} est très sensible au nombre de couches de carbone, permettant de caractériser rapidement l'épaisseur de l'échantillon exfolié [4]. Dans le cas d'échantillons micrométriques présentant des variations spatiales d'épaisseur, ou bien de l'empilement de différents matériaux 2D, l'imagerie Raman

Figure 4. Images Raman de macrophages, cellules spécialisées du système immunitaire, exposés à des microplastiques de polystyrène. La microscopie Raman permet d'identifier les lipides (en vert) et les microplastiques de polystyrène internalisés (en rouge) à partir de leurs vibrations moléculaires spécifiques à 2852 et 3060 cm^{-1} sans marquage. Les spectres Raman correspondants sont présentés à droite. Les microplastiques de polystyrène de taille micrométrique sont localisés dans le cytoplasme de la cellule.



apporte une information vibrationnelle sur la nature des matériaux et leur épaisseur. Un exemple d'imagerie Raman des matériaux 2D est présenté en figure 3 dans le cas d'un dispositif de graphène sur une couche nanométrique isolante de nitrure de bore hexagonal (hBN).

Non destructrice, l'imagerie Raman connaît également un fort développement dans le domaine biomédical, où elle pourrait être utilisée comme technique rapide de diagnostic basée sur l'analyse spectrale d'échantillons biologiques [5]. En effet, chaque cellule est composée de centaines de biomolécules différentes, protéines, lipides, sucres, acides nucléiques, qui contribuent au spectre Raman d'une cellule ou d'un tissu. Or, chaque type cellulaire possède sa propre signature spectrale, ce qui permet par exemple de distinguer des cellules cancéreuses de cellules non cancéreuses dans un même tissu ou d'identifier des bactéries pathogènes. Des recherches sont également menées pour détecter par imagerie Raman des biomarqueurs sanguins de maladies neurodégénératives en associant la détection de biomolécules spécifiques et l'analyse multivariée des données spectrales. L'imagerie Raman est aussi très utile en biologie ou en toxicologie pour l'observation *in situ* de lignées cellulaires ou d'organismes modèles exposés à un stress environnemental ou chimique. La détection de microplastiques de polystyrène dans des macrophages permet ainsi de suivre la phagocytose de particules par les cellules spécialisées du système immunitaire (figure 4).

CONCLUSION

Dans cet article, nous avons illustré quelques applications nouvelles ou originales de la spectroscopie et de l'imagerie Raman. Les directions futures vont vers l'amélioration de sa résolution spatiale avec les techniques de champ proche comme le TERS (tip-enhanced Raman spectroscopy), et vers l'imagerie ultra-rapide reposant sur la diffusion Raman stimulée (SRS). Ces deux techniques encore peu démocratisées ont un avenir prometteur dans l'imagerie des nanomatériaux et du vivant. ●

RÉFÉRENCES

- [1] W. H. Weber, R. Merlin, « Raman Scattering in Materials Science », Springer Series in Materials Science (2000)
- [2] G. Abstreiter, M. Cardona et A. Pinczuk « Light scattering by free carrier excitations in semiconductors », dans Light Scattering in Solids IV, Springer (1984)
- [3] T.P. Devereaux et R. Hackl, Rev. Mod. Phys. **79**, 175 (2006)
- [4] X. Cong, X. L. Liu, M. L. Lin, P. H. Tan, npj 2D Mater. Appl. **4**, 13 (2020)
- [5] K. Kong, C. Kendall, N. Stone, I. Notinghe, Adv Drug Deliv. Rev. **89**, 121 (2015)

Solutions pour la spectroscopie RAMAN

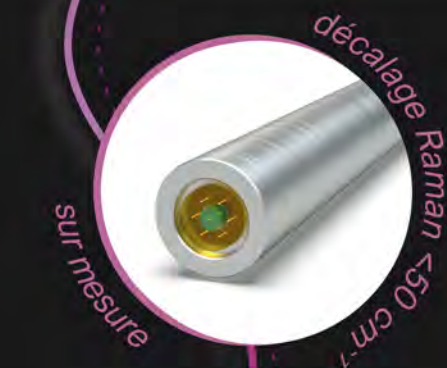
01 Spectromètres haute sensibilité



02 Lasers fibrés RAMAN



03 Sondes fibrées



info@idil.fr

Prototypes d'ingénierie, développement de systèmes complets, intégrations OEM et opto-électroniques

LA SPECTROSCOPIE TÉRAHERTZ: ÉLECTRONS ET VIBRATIONS

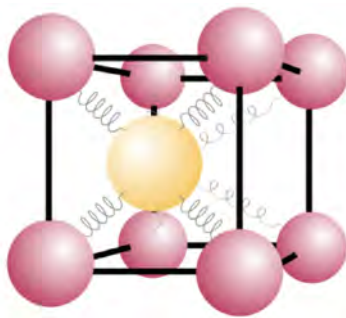
Sarah HOUVER¹, Sophie Eliet BAROIS², Pascale ROY³ et Romain PERETTI²*

¹ Université Paris Cité, CNRS, Matériaux et Phénomènes Quantiques, F-75013 Paris, France

² Institut d'Électronique de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN), CNRS-UMR 8520, Université de Lille, 59652 Villeneuve d'Ascq, France

³ Synchrotron SOLEIL, AILES Beamline, L'Orme des Merisiers, Saint Aubin, France

*romain.peretti@cnrs.fr



Les progrès technologiques ces dernières décennies ont fait croître de façon exponentielle l'utilisation de la spectroscopie TéraHertz. Cette gamme spectrale (1 THz = 10^{12} Hz) permet de sonder et caractériser les phénomènes physiques à basse énergie, où de nombreux processus élémentaires dans la matière, tels que l'interaction des électrons, des spins, des phonons et les modes de rotation moléculaire, présentent des résonances avec une dynamique (sub)-picoseconde. Cette approche trouve des applications prometteuses en physique, chimie, astronomie et médecine.

<https://doi.org/10.1051/photon/202312136>

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 gamme TéraHertz (0.1-10 THz) a longtemps été appelée en anglais « TeraHertz gap » : un fossé duquel il était fastidieux d'extraire de l'information. Elle se situe à des énergies très faibles pour les technologies optiques (1 THz = 4 meV = 33 cm^{-1} ; $\lambda \sim 300 \mu\text{m}$), les longueurs d'ondes correspondantes s'approchant de la taille des objets d'études les plus intéressants. De plus, l'énergie thermique $k_B T$ à température ambiante correspondant à 6.2 THz, les transitions entre niveaux d'énergie dans la gamme THz sont activées

thermiquement ce qui rend leur contrôle complexe. Pour les approches électroniques, au contraire, cette gamme correspond aux hautes fréquences, son utilisation requiert donc de dépasser les limites des approches conventionnelles.

Jusqu'aux années 90, l'extension au domaine THz, essentiellement permis par spectroscopie à transformée de Fourier (FTIR), se trouvait limitée en rapport signal/bruit par les performances des sources et des détecteurs. Les perspectives ont considérablement changé peu après grâce aux progrès technologiques des grands instruments (synchrotrons et

lasers à électrons libres), de l'électronique (chaines de multiplications et analyseurs à réseau vectoriel) et des sources lasers impulsives et continues permettant le développement de nouvelles techniques comme la spectroscopie dans le domaine temporel (TDS). La figure 1 qui rapporte le nombre de publications avec les termes « TeraHertz spectroscopy » et « Far-Infrared spectroscopy » au cours des 70 dernières années, fait état de cette évolution. Ces avancées ont permis le développement d'expériences plus pratiques, fiables et précises, conduisant ainsi à de nombreuses études dans des domaines variés.

Technique	Plage fréquentielle accessible	Résolution spectrale	Précision sur la fréquence (accuracy)	Accordabilité « continue »	Puissance	Type de détection	Objets d'intérêts
Chaîne de multiplication	100 GHz-2.2THz	kHz	kHz	par quelques centaines de GHz	0,01- 10 mW selon les bandes	ambiant jusque 1.7THz	molécules polaires phase gaz
VNA + convertisseurs de fréquence	0-1.1 THz	kHz	kHz	par bandes de quelques centaines de GHz	0,01 – 5 mW selon bandes	ambiant	
TDS	0 - 5THz possible large bande avec source plasma et détection ABCD (+ demandeur en puissance laser)	1 GHz voire moins par CSCR [ref]		0-5THz	10-100μW	ambiant	Matériaux Mesures d'épaisseurs optiques Indices complexes de réfraction (accès module et phase) Spectres large-bande molécules phase gaz
FTIR (extension THz avec rayonnement synchrotron pour haute résolution spatiale ou spectrale)	100 GHz- visible	quelques dizaines de MHz à quelques GHz selon bras mobile	MHz	selon sources, séparatrice et optiques plusieurs centaines ou milliers de cm^{-1}	μW	77K, 4 K ou 1.6 K	Tous matériaux/ molécules dans une très large gamme spectrale Indices de réfraction (avec Kramers Kroenig) Mesures d'échantillons sub-millimétriques (p.e. cellules à enclume de diamant) ou résolution qqes MHz avec le RS
Spectroscopie THz continue à photo-mélange	0 -3 THz	quelques kHz à centaines de kHz selon techniques	du kHz à centaine de MHz selon techniques	quelques centaines de MHz ou GHz selon techniques de verrouillage métrologique		4K	Spectre de rotation molécules polaires phase gaz
Spectroscopie THz résolue en temps avec source FEL	pompe : 0.1 THz- RX Sonde : 0.1 THz- MIR	pompe THz ($\Delta\lambda/\lambda$) 1 %	précision fréquence pompe : 1 % ou plus	Continue	10-0.1 Watts (selon facilités)	4 K	Dynamique de systèmes de la centaine de fsec à la microseconde

Tableau 1. Techniques de spectroscopies TeraHertz les plus courantes (non exhaustives) et leurs caractéristiques principales. Les valeurs données ici sont à titre indicatif et pour idée de comparaison et de complémentarité entre les techniques.

Test&Measurement
YOKOGAWA



AQ6370E
Optical Spectrum Analyzer

**The OSA market leader
in the telecom industry**

In cooperation with:



wavetel
a simac group company

www.wavetel.fr
about@wavetel.fr

Discover it here:



Precision Making
www.tmi.yokogawa.com

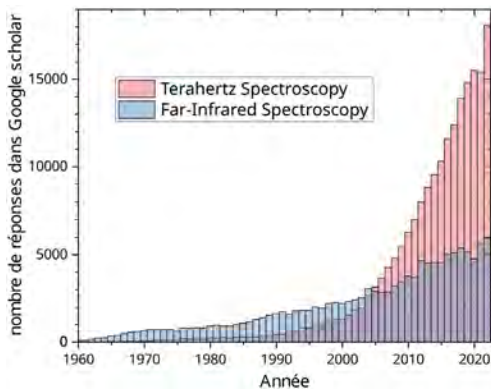


Figure 1. Nombre d'articles trouvés par google Scholar pour les recherches « TeraHertz spectroscopy » et « Far-Infrared Spectroscopy » en fonction de l'année depuis 1960. On observe nettement le croisement dans les années 2000 découlant de la propagation des techniques développées dans les années 90.

C'est la force de la gamme TéraHertz, où les ondes électromagnétiques sondent la dynamique picoseconde des porteurs de charges, témoignant de la physique de ces porteurs, mais également les vibrations de la matière (matrices ou molécules) qui les accueillent. Dans cet article, nous aborderons ces deux aspects fondamentaux de la spectroscopie TéraHertz : la physique des porteurs de charge et celle des vibrations de la matière, en mettant en évidence les phénomènes explorables et les perspectives dans ces domaines dont quelques illustrations sont données sur la figure 2.

SPECTROSCOPIE THZ DE LA PHYSIQUE DES PORTEURS DE CHARGES

La spectroscopie THz est particulièrement pertinente pour sonder les porteurs de charge notamment dans les semi-conducteurs. Combinée au modèle de Drude des porteurs, elle permet une détermination directe des paramètres clés tels que la fréquence plasma et le taux de diffusion des porteurs comme le montre l'ajustement de la réflectivité, présenté sur la figure 2. Mais elle n'est pas limitée à ces grandeurs à l'équilibre. Le caractère résolu en temps de la TDS permet de combiner une

impulsion de pompe qui excite le système, à l'impulsion THz qui sert de sonde, et ainsi étudier les états électroniques hors équilibre et leur dynamique de relaxation. Ces caractérisations sont essentielles pour des matériaux à visée technologique en optoélectronique.

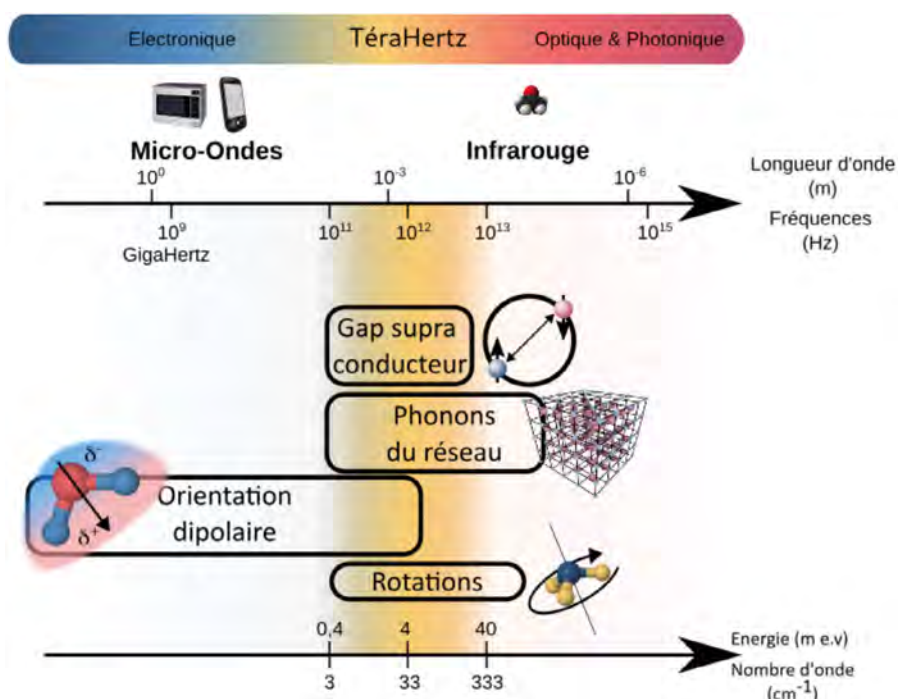
De plus, grâce à la génération d'impulsions THz intenses, les études de spectroscopie THz non-linéaire se sont multipliées, permettant par exemple l'étude de la courbure de bandes électroniques (*i.e.* leurs masses effectives), le champ électrique THz permettant à la fois de sonder et d'accélérer les porteurs. Ces spectroscopies sont également utilisées pour étudier les porteurs de matériaux plus exotiques comme les matériaux topologiques, et les états électroniques fortement corrélés tels que la supraconductivité.

La supraconductivité est caractérisée par plusieurs propriétés physiques dont la plus connue est l'absence totale de résistance. Lorsqu'un matériau devient supraconducteur, les électrons qui le composent se regroupent en paires appelées paires de Cooper qui

ont la particularité de ne pas subir de collisions avec les atomes du matériau. Cette particularité donne lieu à une structure spectroscopique « **le gap supraconducteur** » qui caractérise la supraconductivité. Elle est mise en évidence par des variations d'intensité lors de mesures d'absorbance du matériau (en film mince) ou lors de mesures de réflectivité (pour les matériaux massifs). En mesurant cette structure, il est possible de déterminer l'énergie du gap. Pour la plupart des supraconducteurs conventionnels comme les métaux ou les alliages, cette signature spectrale s'observe dans le domaine THz en utilisant des techniques telles que la spectroscopie FTIR ou la TDS sur des matériaux refroidis à des températures cryogéniques.

La recherche sur la supraconductivité est très active, avec l'objectif triple de découvrir de nouveaux matériaux qui présentent des propriétés supraconductrices, de mettre au point des conditions pour le développement de transitions supraconductrices à température ambiante et d'affiner la théorie décrivant l'appariement des électrons pour les composés supraconducteurs

Figure 2. Visualisation des plages fréquentielles dans lesquelles les effets physiques discutés dans l'article sont observés.



non-conventionnels. Dans ce contexte, les études optiques permettant l'observation du gap dans de nouvelles familles de matériaux supraconducteurs (cuprates, pnictures, nickelates, supraconducteurs organiques...) contribueront à terme au développement de théories décrivant leurs propriétés physiques dont le mécanisme de l'appariement des électrons. Par ailleurs, la quête de supraconducteurs à plus haute température s'est orientée récemment vers l'hydrogène métallique et les composés contenant de l'hydrogène, tels que les hydrures. L'ensemble de ces découvertes pourraient ouvrir la voie à de nouvelles applications pratiques de la supraconductivité.

En plus de sonder les porteurs de charge, la spectroscopie THz peut également sonder les spins portés par les électrons. C'est alors le champ magnétique THz qui se couple aux modes magnétiques présents dans certains matériaux. La spectroscopie THz, notamment la spectroscopie THz en émission, permet ainsi de sonder l'aimantation de matériaux et leur dynamique d'aimantation lorsque celle-ci est photo-induite, à des échelles de temps femtosecondes. De nombreuses technologies reposent sur les propriétés de matériaux magnétiques, la caractérisation et la compréhension des dynamiques d'aimantation est un point clé pour ouvrir de nouvelles applications.

SPECTROSCOPIE TÉRAHERTZ VIBRATIONNELLE

Au-delà de la physique des porteurs de charge, la spectroscopie THz permet de sonder certains modes vibrationnels et rotationnels des molécules et des solides. Si la liaison interatomique est polaire (distribution des charges inégales), le champ électromagnétique incident peut se coupler au dipôle que constitue la liaison. Ce couplage est bien décrit par le modèle simple de Lorentz qui permet de remonter à la fréquence de vibration et à l'amortissement de la liaison, et donc fournit des informations essentielles sur l'agencement structural du système considéré. Ces signatures sont significatives non seulement dans les cristaux solides qui présentent une structure bien définie mais également dans les cristaux moléculaires

qui reposent sur des liaisons faibles ou encore dans les liquides polaires tels que l'eau et dans les gaz moléculaires.

La spectroscopie des phonons dans les solides [1] est un véritable enjeu en particulier dans les matériaux quantiques qui présentent différentes phases structurales souvent associées à des phases électroniques complexes. Ils ont un rôle important dans la relaxation des porteurs et peuvent être même fortement couplés aux porteurs, donnant naissance à des états hybrides (quasi-particules) dont la physique est très riche. Les phonons peuvent également se coupler à d'autres phonons, offrant de nouvelles routes d'excitation par couplage interposé. La mise en évidence de ces couplages entre différents modes a pris récemment plus d'essor grâce au développement de la spectroscopie bidimensionnelle dite 2D-THz, qui donne accès à la cohérence des modes. La spectroscopie THz permet d'accéder aux phonons qui ne sont pas accessibles par la spectroscopie Raman et permet de sonder ces modes dans un état hors équilibre (limité en Raman), ce qui permet de mettre en évidence les mécanismes à l'œuvre dans les transitions de phases, en particulier photo-induites.

Le rôle des vibrations de la structure est fondamental dans les matériaux ferroélectriques. En effet, la distribution de charges dans la structure cristalline y est asymétrique, au point de résulter en une polarisation globale. Lorsqu'un champ électrique de faible énergie d'activation est appliqué, il modifie cette distribution de charges, en inversant la polarisation. La signature de cette transition contrôlable est appelée le mode mou. Les études dans le THz et l'infrarouge de ces modes impliquent de mesurer la variation de l'absorption en fonction de la fréquence et de la polarisation de la lumière. Elles permettent également de déterminer la température à laquelle le mode mou est activé, ainsi que sa fréquence et son amplitude et donc fournissent une description riche de la transition ferroélectrique. Pour un ferroélectrique idéal, le mode mou apparaît dans le domaine THz et est décalé progressivement vers une fréquence quasi nulle à la température de transition. ● ● ●

21 digits.

Difference Frequency Comb



**World record stability...
... has never been easier!**

DFC CORE +

- Compact: Fully self-referenced comb including electronics – 19 inch compatible
- Robust: Passive f_{CEO} stabilization for each pulse
- High-end: Stability transfer at the 10^{21} level
- Convenient: Control everything from a single window

learn more...



TOPTICA

Dans de nombreux cas, le mode mou n'est pas unique et plusieurs modes polaires signent la polarisation du matériau. C'est le cas dans les ferroélectriques à base de solutions solides telles que le PbZrTiO_3 , ferroélectrique le plus exploité ou les oxydes d'Hafnium ou de Zirconium, très prometteurs pour les applications futures. Dans ce cas, l'observation des modes polaires est primordiale pour comprendre les propriétés des matériaux ferroélectriques et pour optimiser leur utilisation dans les dispositifs électromécaniques.

Lorsque les propriétés ferroélectriques s'accompagnent de propriétés ferromagnétiques, le matériau est dit multiferroïque. Ce dernier peut présenter des modes hybrides particuliers appelés électro-magnons, qui résultent du couplage entre une onde de spin et un phonon. Ces modes suscitent un vif intérêt car ils ouvrent la voie à l'excitation d'un mode magnétique par un champ électrique, *via* le couplage avec la structure. Leurs études permises par la spectroscopie THz sont très prometteuses dans des composés tels que BiFeO_3 , TbMnO_3 ou encore CuO .

Les signatures structurales mises en évidence par la spectroscopie THz sont également notables dans les cristaux moléculaires. Ces derniers sont des cristaux dont la maille élémentaire est composée d'une ou plusieurs molécules. Le plus connu est la glace d'eau, mais ils comprennent aussi les sucres et de nombreux solides organiques. La cohésion du cristal est assurée par les forces de van der Waals, la polarisation des molécules et des liaisons hydrogène. Leur structure cristalline suit la géométrie de la molécule et dépend du degré d'hydratation ce qui engendre une large complexité. En conséquence, on observe du polymorphisme ainsi que des co-cristallisations donnant naissance à des spectres THz riches et complexes. En sondant les vibrations délocalisées au sein de ces cristaux, la spectroscopie THz permet d'identifier leur composition, la ou les phases cristallines et leur degré

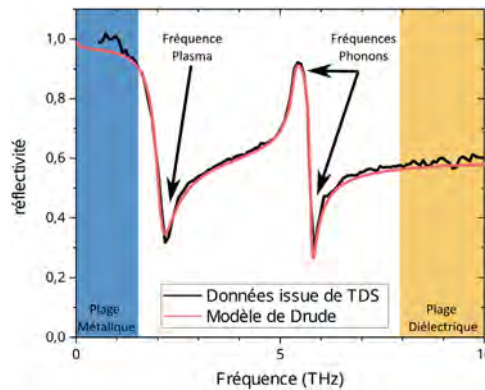


Figure 3. Réflectivité sur la gamme [0-10] THz d'un semiconducteur à faible gap, l'antimoine d'indium InSb [5]. A température ambiante, ce matériau est intrinsèquement dopé et présente des porteurs libres, caractérisés par la fréquence plasma. La spectroscopie THz permet également de mettre en évidence les phonons.

d'hydratation, que ce soit pour le produit fini ou pendant sa transformation. Ces études trouvent des applications en pharmacie notamment pour le contrôle qualité de fabrication de comprimés *via* l'évaluation de la cristallinité et la porosité des produits.

La spectroscopie THz permet par ailleurs d'investiguer l'organisation structurale des liquides. L'eau est un exemple particulièrement intéressant

qui, comme tout liquide polaire, présente un spectre d'absorption large bande très intense dans la gamme THz (typiquement 400 cm^{-1} @ 1THz) [2].

Au début du 20^e siècle, Debye modélise la réponse d'un liquide à une excitation électromagnétique. Il suppose des molécules polaires diluées dont le dipôle s'oriente selon le champ électrique, jusqu'à une collision avec une autre molécule. Ce modèle décrit la réponse des liquides dans les gammes basses fréquences mais se trouve limité dans la plage THz et au-delà. En effet, il néglige l'inertie des molécules qui est prépondérante entre deux collisions, les interactions entre les dipôles des molécules ainsi que la complexité du réseau de liaisons hydrogènes qui joue pourtant un rôle essentiel.

De par cette grande absorption, la spectroscopie THz est fréquemment utilisée pour étudier les variations du réseau de liaisons hydrogène dans un matériau. L'étude de mélanges de liquides notamment ioniques, permet de mieux comprendre les interactions moléculaires en son sein et le rôle des ions dans la constitution du réseau de liaison hydrogène. Il faut aussi noter l'ensemble des travaux effectués sur la solvation des protéines, décrivant une organisation du solvant en jusqu'à six coquilles successives autour des protéines, définissant ainsi la forme de la protéine, ce qui lui confère sa fonction.

La spectroscopie THz d'échantillons liquides offre de nombreuses perspectives pour mieux comprendre les effets intermoléculaires au cours

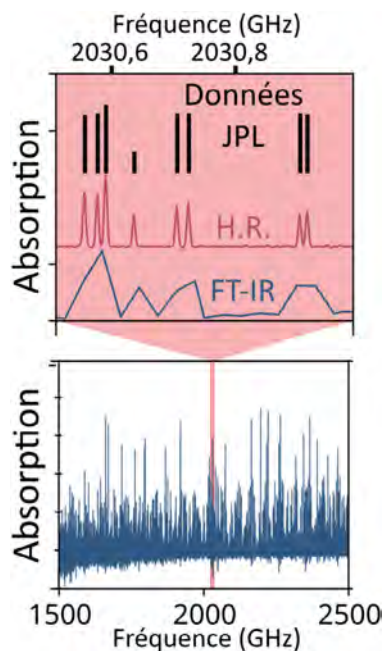


Figure 4. Exemple de spectres de rotation du méthanol en phase gaz. Deux spectromètres différents ont été mis en œuvre et utilisent la lumière synchrotron comme source. En bleu, enregistrement par une technique large bande FT-IR. En rouge, enregistrement sur une portion beaucoup plus réduite mais à très haute résolution (H.R.) par méthode d'hétérodynage mettant en jeu un laser moléculaire à gaz comme oscillateur local [3]. Les positions des raies en fréquence correspondent à celles prédites par la théorie, renseignées dans la base de données du Jet Propulsion Laboratory (JPL).

de réactions chimiques. Enfin, l'étude de l'eau elle-même reste un challenge dans la gamme THz et plusieurs groupes travaillent à la détermination d'un modèle analytique de l'eau, car à l'heure actuelle seuls des modèles numériques permettent de prévoir sa réponse.

SPECTROSCOPIE ROTATIONNELLE

À l'état gaz, les molécules polaires possèdent une signature spectrale d'absorption dans la gamme THz correspondant principalement à leurs transitions rotationnelles, déterminée par la conformation globale de la molécule [4]. Les isomères de conformation ou des molécules de composition isotopique différentes possèdent donc des spectres de rotation ou ro-vibration aux signatures distinctes. La spectroscopie de molécules en phase gaz s'effectue, selon les besoins et les applications, dans différents régimes de pression. À faible pression, appelé régime Doppler, la largeur de raie est définie par la masse de la molécule et la fréquence centrale de la raie, une espèce moléculaire possède des transitions très fines en gamme THz (du kHz au MHz). De fait, ce régime confère un fort pouvoir discriminant encore plus avantageux que dans l'infrarouge, notamment d'intérêt atmosphérique ou astrophysique pour l'étude de mélanges de différents gaz ou d'espèces sous forme de traces. Ces études contribuent au fort intérêt pour les techniques spectroscopiques à très haute résolution (Tableau 1). Les applications liées à la spectroscopie en phase gaz concernent aussi le sondage de procédés industriels avec des environnements chargés en particules qui pourraient constituer des milieux trop

diffusants pour des techniques optiques.

Ainsi, il est nécessaire de mener, préalablement aux études de terrains, des études spectroscopiques en laboratoire dans différents régimes de pression, sur l'espèce d'intérêt pur (ou l'espèce d'intérêt diluée dans un autre gaz) afin d'en connaître tous les paramètres spectroscopiques (position, coefficients d'élargissements, déplacement du centre par l'effet de pression, force d'absorption des raies) qui eux-mêmes permettront une identification et une quantification sans ambiguïté. Les techniques large-bande (sur plusieurs THz), bien que moins résolues, sont un complément indispensable. La combinaison de techniques large-bande puis haute résolution sur des régions plus restreintes permet ainsi des études riches et complémentaires (figure 4).

CONCLUSION

Nous avons présenté dans cet article la richesse des études menées grâce à la spectroscopie THz. Bien que non exhaustifs, les exemples choisis montrent les impacts forts de ces études dans leurs domaines d'application respectifs. Pour aller plus loin et atteindre des mesures THz à l'échelle nanométrique, le développement actif d'expériences de microscopie en champ proche et de microscopie à effet tunnel guidée par impulsions THz, démontre ainsi que la spectroscopie THz est encore au début de son essor qui annonce des perspectives prometteuses. Du point de vue applicatif, des efforts sont déployés dans l'analyse du signal afin de rendre les résultats plus quantitatifs et de permettre une utilisation robuste de la spectroscopie THz dans de nombreux domaines de la recherche et de l'industrie. ●

RÉFÉRENCES

- [1] P.A. Banks *et al.*, *Nat. Rev. Chem.* **1-16**, (2023)
- [2] O. Molyanskaya *et al.*, *Progress in Quantum Electronics* **62**, 1 (2018)
- [3] T. S. Hearne *et al.*, *Opt. Express* **30**, 7372 (2022)
- [4] L. Yang *et al.*, *Reviews in Analytical Chemistry* **37**, 3 (2018)
- [5] S. Houver *et al.*, *Opt. Express* **27**, 10854 (2019)

2BLighting Technologies

High performance and reliable fiber optic assemblies



PM+

Ultra high Polarization Extinction Ratio (PER)

- Up to +4dB higher PER
- State-of-the-art Insertion Loss (IL) and Return Loss (RL) values
- Best connector type and tolerance E-2000®, DMI, Mini AVIM® and Micro AVIM®
- Available on homologated fibres and cables

16W



NEW

E-2000® PS+

Contact expanded beam

- Low loss
- Interlock solution optional
- 1310-1550nm or 980-1060nm

100W



E-2000® PSm

Contact pump laser connector

- Low loss
- Interlock solution optional
- MM 105 0.22NA (MM 200 0.22NA optional)



www.2blighting.fr

info@2blighting.com

+33 1 64 59 21 30

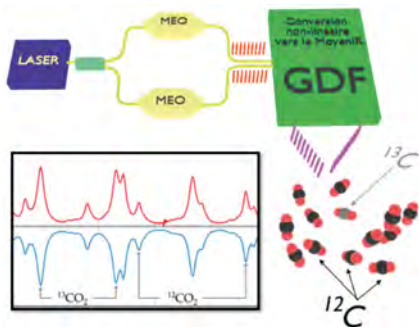
SPECTROSCOPIE À DEUX PEIGNES DE FRÉQUENCES ÉLECTRO-OPTIQUES POUR LA MESURE DE RAPPORTS ISOTOPIQUES

Alexandre PARRIAUX¹, Kamal HAMMANI¹, Guy MILLOT^{1,2,*}

¹ ICB UMR 6303 CNRS/Université de Bourgogne, 9 avenue Alain Savary, 21078 Dijon, France

² Institut Universitaire de France, 1 rue Descartes, 75005 Paris, France

*Guy.Millot@u-bourgogne.fr



Nous montrons que la spectroscopie à double peignes électro-optiques permet de mesurer le rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ avec une précision meilleure que 2‰ pour un temps d'enregistrement de quelques dizaines de secondes. Les résultats sont compatibles avec des mesures obtenues à l'aide d'un spectromètre de masse.

<https://doi.org/10.1051/photon/202312142>

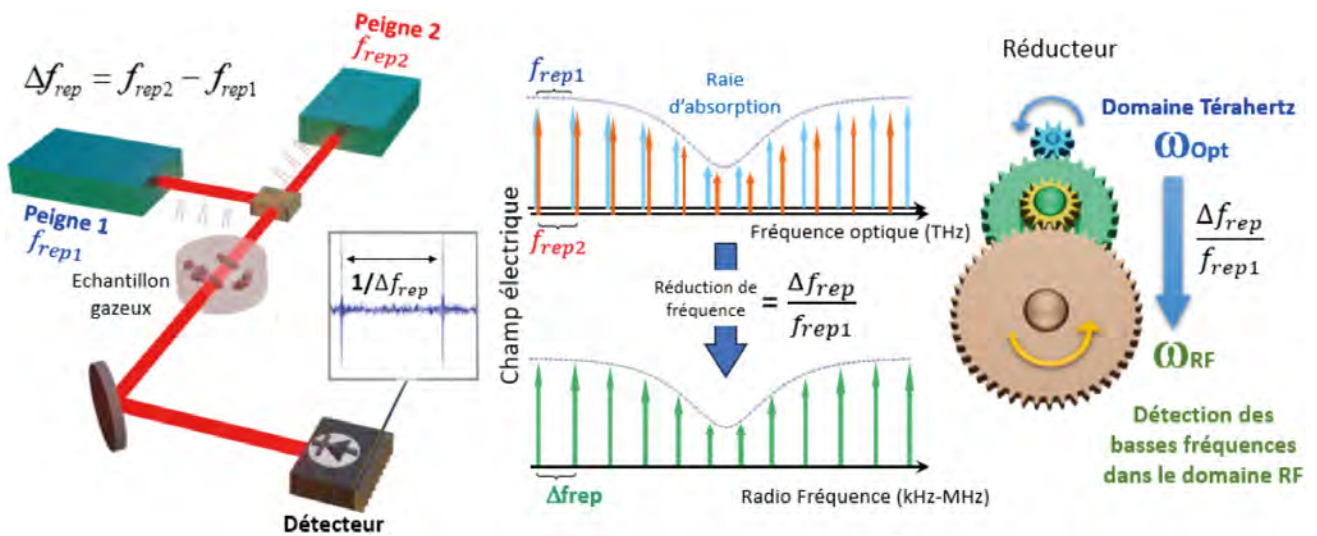
L'AVANCÉE INSTRUMENTALE NOVATRICE LA PLUS AVANT-GARDISTE DANS LE DOMAINE DE LA SPECTROSCOPIE !

Les peignes de fréquences ont fait l'objet de nombreuses démonstrations ces dernières décennies pour les mesures précises dans le domaine temps fréquence. Ils ont notamment révolutionné la spectroscopie de précision et jouent un rôle clé dans les horloges atomiques de nouvelle génération. Un peigne de fréquences optique est le spectre généré par une source laser émettant un train d'impulsions périodiques et cohérentes entre elles. Il est constitué de milliers de raies étroites

séparées par un intervalle constant f_{rep} égal à la fréquence de répétition des impulsions. L'enveloppe du spectre, donnée par la transformée de Fourier d'une impulsion unique, sera d'autant plus large que l'impulsion est étroite. Un peigne de fréquences est une source lumineuse équivalente à plusieurs milliers voire millions de lasers continus émettant à l'unisson !

La technique du double peigne, qui s'applique en particulier à la spectroscopie moléculaire, est un domaine en plein essor [1]. Ici, deux peignes ayant des taux de répétition légèrement différents f_{rep1} et $f_{rep2} = f_{rep1} + \Delta f_{rep}$ sont utilisés pour s'échantillonner l'un l'autre.

L'analyse des fréquences de battement dans le domaine radiofréquence (RF) est utilisée pour collecter les informations spectroscopiques, l'absorption d'un gaz par exemple, et remplace ainsi les réseaux dispersifs ou autres éléments sélectifs en longueur d'onde. La mesure de l'absorption dans le domaine RF est beaucoup plus facile et directe car un photodétecteur à faible bande passante peut être utilisé. La spectroscopie à double peigne, appelée DCS pour « Dual Comb Spectroscopy », est basée sur une conversion de fréquences du domaine optique au domaine RF équivalente à un réducteur mécanique (Fig. 1).



La technique est similaire à la spectroscopie à Transformée de Fourier infrarouge (FTIR) mais sans spectromètre ! Elle constitue une avancée instrumentale majeure dans le domaine de la spectroscopie. Elle améliore les performances de la spectroscopie FTIR de façon spectaculaire en termes de temps d'acquisition, sensibilité, résolution et calibration en absolu des fréquences.

La combinaison de la large couverture spectrale des peignes avec la haute précision et la finesse spectrale des raies individuelles permet de nouvelles modalités de mesure pour l'analyse sélective et sensible, même

pour des mélanges de gaz complexes. Les défis à relever par la spectroscopie à double peigne sont multiples :

- Pour les applications spectroscopiques et analytiques, les peignes doivent être générés dans la région spectrale d'intérêt, en particulier le moyen infrarouge MIR (3-5 μm) correspondant à la région de « l'empreinte moléculaire ».
- L'espacement des raies des peignes doit être adapté à l'analyte : La

spectroscopie des gaz, en particulier à faible pression pour améliorer la sélectivité, nécessite un espacement de l'ordre de la centaine de MHz.

- Pour fournir un échantillonnage mutuel précis, les deux peignes doivent être générés avec un degré élevé de stabilité de phase (cohérence) mutuelle. C'est pourquoi sa mise en œuvre nécessite une très haute stabilité en fréquence des deux peignes et des techniques d'asservissement complexes doivent être déployées ce qui constitue un frein majeur à la démocratisation de la technique. Un verrou technologique doit être levé.

SPECTROGON

State of the art products

Filtres Interférentiels

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



Réseaux Holographiques

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



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

www.spectrogon.com

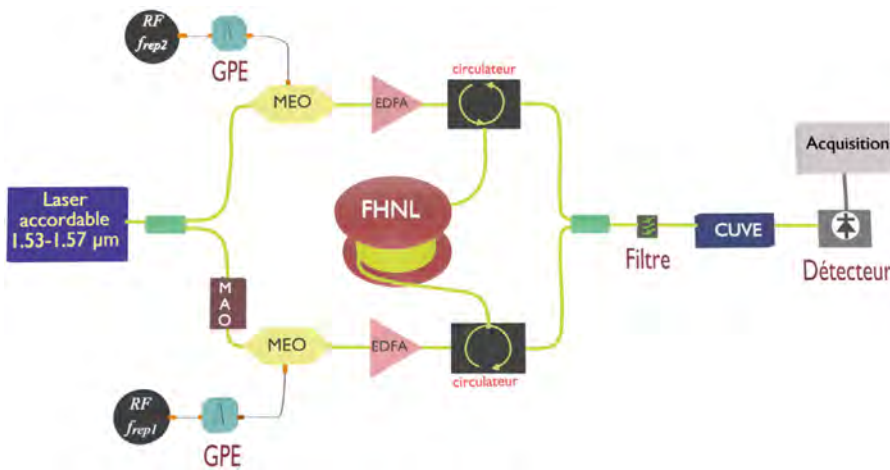


Figure 2. Spectromètre à deux peignes de fréquences électro-optiques. MAO : modulateur acousto-optique, MEO : modulateur électro-optique, GPE : générateur de pulse électrique, EDFA : amplificateur à fibre dopée Erbium. Les impulsions super-gaussiennes de 50 ps sont amplifiées puis leur spectre élargi par ondes de choc dispersives dans une fibre optique hautement non linéaire (FHNL) à dispersion normale. Les deux peignes se propagent en sens opposé dans la même fibre optique afin de préserver leur cohérence mutuelle.

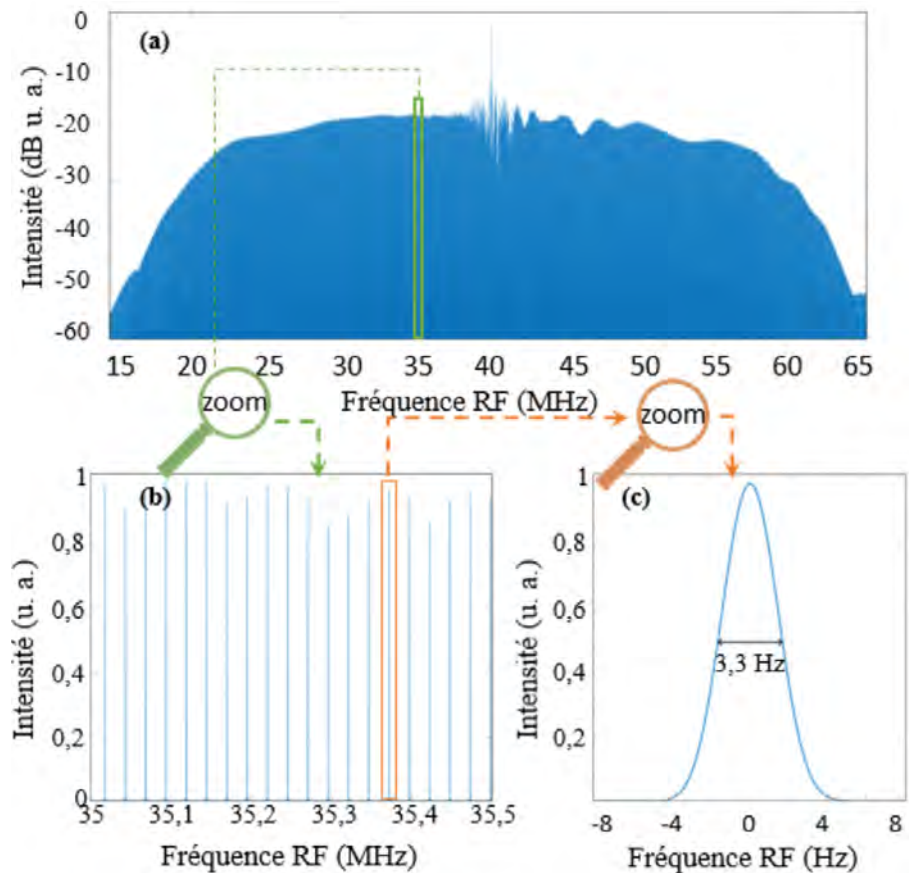
NOTRE CONCEPT NOVATEUR : LA SPECTROSCOPIE À DEUX PEIGNES DE FREQUENCES ÉLECTRO-OPTIQUES

Nous avons levé ce verrou technologique en inventant la spectroscopie à deux peignes électro-optiques (EO-DCS) [2,3]. L'idée consiste à générer les deux peignes à partir d'une source laser unique, garantissant ainsi une cohérence mutuelle intrinsèque sans aucun système d'asservissement. Les peignes sont générés par modulation de l'intensité d'un laser continu de grande finesse spectrale à l'aide de deux modulateurs électro-optiques réglés à des fréquences légèrement différentes (Fig. 2). Le laser à onde continue est accordable dans le proche infrarouge aux longueurs d'onde télécom d'environ 1,55 μm . Les impulsions générées d'une durée de 50 ps conduisent à des peignes étroits qui sont alors élargis dans une fibre optique pour générer des peignes plats, faiblement bruités et de quelques nanomètres de large (Fig. 3). Un modulateur acousto-optique décale la longueur d'onde de l'un des deux peignes pour éviter un problème de recouvrement responsable d'interférences parasites. Un zoom du spectre RF révèle des

raies individuelles d'une largeur de seulement 3,3 Hz, soit environ un dix-millième de l'intervalle spectral Δf_{rep} entre deux raies ce qui démontre un haut degré de cohérence mutuelle entre les deux peignes sans aucun système d'asservissement.

Le spectromètre a été développé initialement dans le proche infrarouge (NIR) aux longueurs d'onde télécom $\sim 1,56 \mu\text{m}$ [2]. Notre challenge a été d'étendre la technique aux environs de 2 μm [4] et au moyen infrarouge MIR (3 à 5 μm) [5,6] où les gaz absorbent fortement. L'extension dans le moyen infrarouge permet d'aborder de nombreuses applications comme la mesure précise de rapports isotopiques.

Figure 3. (a) Exemple typique de spectre RF enregistré avant la cuve d'absorption, centré à la fréquence de décalage 40 MHz du modulateur acousto-optique. Un rapport signal sur bruit de l'ordre de 30 dB est obtenu. Ici, $f_{\text{rep1}} = 250 \text{ MHz}$, $\Delta f_{\text{rep1}} = 25 \text{ kHz}$ et la puissance initiale des impulsions avant injection dans la fibre optique est $P = 26 \text{ W}$. Un zoom du spectre RF (b, c) montre que les raies du peigne sont clairement résolues et une largeur de raie de 3,3 Hz est observable avec un interférogramme enregistré de 500 ms.



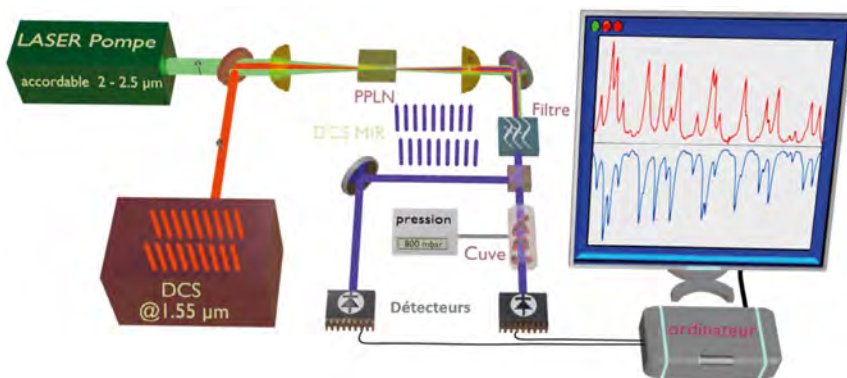


Figure 4. : Schéma du spectromètre infrarouge à deux peignes de fréquences électro-optiques. Les peignes sont générés dans le proche infrarouge autour de 1,55 μm puis convertis dans le moyen infrarouge ($> 4 \mu\text{m}$) grâce à un cristal non linéaire PPLN pompé par une source laser continue accordable entre 2 et 2,5 μm .

MESURE DE RAPPORTS ISOTOPIQUES PAR LA TECHNIQUE EO-DCS

La mesure du rapport isotopique (MRI) est une technique largement utilisée qui présente un grand intérêt pour un large éventail d'applications. Par exemple, les analyses du rapport strontium $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ont été utilisées avec succès pour reconstituer le parcours des derniers mois précédant la mort de la fille d'Egtved il y a 3500 ans. D'une manière analogue, les MRI oxygène $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, carbone $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ et thorium $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ ont été utilisées pour la datation de constructions humaines préhistoriques telles que la grotte de Bruniquel. En astronomie, les MRI permettent d'étudier l'atmosphère et les roches sédimentaires d'autres planètes, comme Mars, ou d'étudier la composition des météorites en analysant les isotopes du magnésium ou de l'oxygène. Pour des applications plus quotidiennes, les aliments et les boissons peuvent être soumis à des MRI pour détecter la présence de bactéries ou pour détecter l'origine géographique des vins, des champignons et même des fromages. Un autre exemple d'application où les MRI sont effectuées est le domaine médical par exemple pour la détection de l'infection par *Helicobacter pylori*, qui peut être réalisée par la MRI $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ dans l'air expiré d'un patient. Tous ces exemples de MRI utilisent principalement un spectromètre de masse qui est un instrument spécifique très performant mais coûteux et dont les temps de mesure peuvent être de plusieurs minutes. De plus, les échantillons étudiés peuvent nécessiter un prétraitement avant d'être

analysés, ce qui augmente la complexité et peut induire des incertitudes supplémentaires. C'est pourquoi d'autres techniques ont été mises au point pour les MRI telle que la spectroscopie d'absorption pour l'analyse des gaz. Cette technique laser non destructive conduit à des instruments plus compacts adaptés à des mesures *in situ*. Seuls quelques travaux ont envisagé l'utilisation de la DCS pour la MRI dans les gaz mais aucune mesure quantitative n'a été effectuée avant notre étude.

Dans notre étude, les peignes de fréquences générés dans le NIR sont convertis par génération de différence de fréquences (GDF) dans un cristal de niobate de lithium polarisé périodiquement (PPLN) pour atteindre la région spectrale entre 4,2 et 4,85 μm (Fig. 4). La partie fibrée permettant de générer les peignes à 1,555 μm avec des MEOs est équivalente à celle décrite sur la figure 2. Les deux peignes élargis sont ensuite couplés puis envoyés en espace libre afin d'être superposés sur un miroir dichroïque avec l'onde idler continue à environ 2,415 μm . Juste avant leur injection dans le PPLN de 10 mm de long, les peignes à 1,555 μm ont une puissance crête de 1,4 W et une largeur spectrale de 3 nm avec $f_{\text{rep}1} = 250 \text{ MHz}$ et $f_{\text{rep}2} = f_{\text{rep}1} + \Delta f_{\text{rep}} = 250,025 \text{ MHz}$. La fréquence de décalage du MAO est de 40 MHz. L'onde idler a une puissance de 2,5 W. Le cristal PPLN est contrôlé en température pour optimiser l'efficacité de conversion.

Nous avons effectué différents tests de validation de la technique EO-DCS pour des mesures précises de rapports ●●●



MESO

A NEW TOOL FOR INTERFEROMETRY APPLICATIONS

Insensitive to vibrations

At-wavelength metrology

Flat surfaces from 1.5" to 6"

Parallel Optics testing

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

www.imagine-optic.com



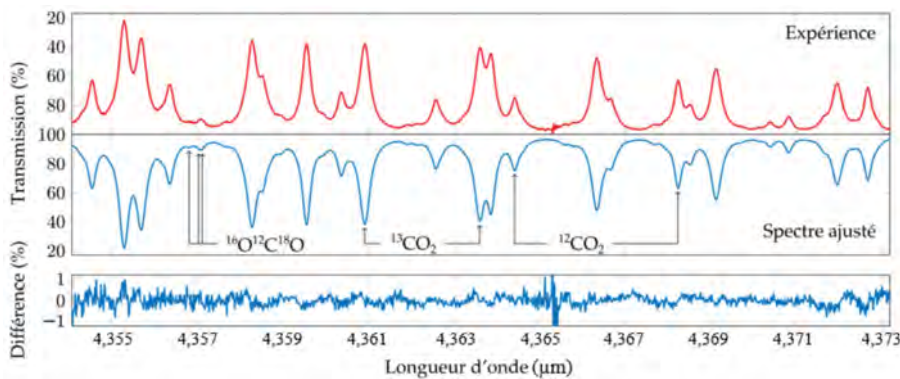


Figure 5. : (Haut) Spectre d'absorption d'un mélange de gaz à 2,5 % de CO₂ et à 97,5 % d'air enregistré autour de 4,364 µm à une pression de 800 mbar. (Milieu) Spectre d'absorption ajusté à l'aide des paramètres de raies provenant de la base de données HITRAN. (En bas) Différence entre le spectre expérimental et ajusté.

isotopiques. Pour cela, nous avons exploité une zone spectrale autour de 4,36 µm contenant des raies d'absorption de ¹²CO₂ et ¹³CO₂ à des intensités similaires lorsque ces isotopologues sont proches de l'abondance isotopique naturelle (Fig. 5). Cette région spectrale présente également l'avantage d'être transparente à la vapeur d'eau. Plus précisément, nous avons ciblé la région spectrale entre 4,355 et 4,373 µm. La mesure absolue du rapport isotopique $r = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$ peut être déterminée en ajustant un profil théorique au spectre expérimental. Chacune des raies contribuant à l'absorption dans la fenêtre spectrale expérimentale d'intérêt est habillée par un profil de Voigt et le spectre calculé avec les paramètres de raies données par la base HITRAN est une superposition linéaire de ces profils [6].

La mesure absolue est cependant complexe à réaliser avec précision et il est préférable d'effectuer une mesure relative à l'aide d'un échantillon de référence pré-caractérisé. La valeur relative est exprimée par le paramètre δ défini comme suit :

$$\delta^{13}\text{C} = 1000 \left(\frac{{}^{13}r_{\text{exp}}}{{}^{13}r_{\text{ref}}} - 1 \right) \text{‰}.$$

L'échantillon de référence est généralement lié à la bélemnite de Vienna Pee Dee (VPDB).

Pour réaliser l'étalonnage du spectromètre, nous avons mesuré l'absorption d'une cuve de 10 cm de long remplie d'un mélange à 2,5 % de CO₂ et 97,5 % d'air synthétique à une pression totale de 800 mbar provenant d'une bouteille de gaz pré-caractérisé à l'aide d'un spectromètre de masse. Un

exemple typique de spectre expérimental issu d'un interférogramme de 20 secondes est représenté sur la figure 5 et comparé à un spectre théorique ajusté par moindres carrés. Le rapport r_{exp} est alors extrait et une seconde mesure de ce rapport est effectuée dans les mêmes conditions avec une autre bouteille de gaz pré-caractérisé. Le spectromètre est ainsi étalonné à partir de ces deux mesures et $\delta^{13}\text{C}$ peut être mesuré avec exactitude sur un échantillon inconnu de CO₂ [6]. La mesure r_{exp} sur l'échantillon inconnu est réalisée plusieurs fois sur plusieurs jours conduisant à la valeur moyenne $\delta^{13}\text{C} = (-33,2 \pm 1,7) \text{‰}$. Notons que l'incertitude est une fois la déviation standard des mesures individuelles. La mesure obtenue avec le spectromètre à

double peignes électro-optiques est en bon accord avec celle effectuée à l'aide du spectromètre de masse à rapport isotopique qui a servi à la calibration, soit $\delta^{13}\text{C} = (-34,3 \pm 0,1) \text{‰}$.

CONCLUSION

Les peignes de fréquences électro-optiques sont un sujet de recherche en pleine expansion au niveau international et différents groupes de recherche se sont inspirés de nos travaux. Ces peignes sont très efficaces pour la spectroscopie à double peigne appliquée à la mesure de rapports isotopiques dans le moyen infrarouge. Le rapport isotopique relatif $\delta^{13}\text{C}$ a été mesuré avec une précision meilleure que 2‰ validée par un spectromètre de masse [6]. La précision obtenue permet d'envisager plusieurs applications, par exemple le diagnostic de l'infection gastrique à Helicobacter Pylori (analyse de l'air expiré), connue pour être la principale cause d'ulcères peptiques chez l'être humain et qui nécessite un seuil de détection autour de 3‰. Notre précision est même comparable à la précision d'un spectromètre embarqué sur un rover martien tel que Curiosity qui est environ de 2‰. Le spectromètre à double peigne électro-optique permet de mesurer d'autres rapports isotopiques d'autres espèces chimiques sans modification majeure. Différentes améliorations sont envisageables [6] permettant d'en augmenter sa précision et d'en faire un instrument capable de rivaliser avec plusieurs spectromètres de rapport isotopique actuellement disponibles sur le marché. ●

RÉFÉRENCES

- [1] N. Picqué and T. W. Hänsch, *Nat. Photonics* **13**, 146 (2019)
- [2] G. Millot *et al.*, *Nat. Photonics* **10**, 27 (2016)
- [3] A. Parriaux, K. Hammani, G. Millot, *Adv. Opt. Photonics* **12**, 223 (2020)
- [4] A. Parriaux, K. Hammani, G. Millot, *Commun. Phys.* **1**, 17 (2018)
- [5] M. Yan *et al.*, *Light Sci. Appl.* **6**, e17076 (2017)
- [6] A. Parriaux *et al.*, *Phys. Rev. Res.* **4**, 023098 (2022)

SPECTROSCOPIE HAUTE RÉSOLUTION : L'APPORT DES IONS PIÉGÉS REFROIDIS PAR LASER

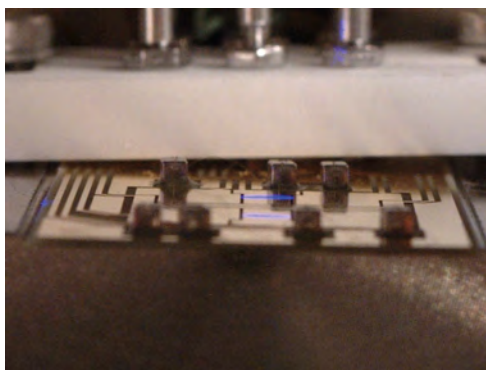
Luca GUIDONI¹, Marie HOUSSIN², Jean-Philippe KARR³

¹ Laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques, Université Paris-Cité, Paris, France

² Laboratoire de Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires, Université d'Aix-Marseille, Marseille, France

³ Laboratoire Kastler Brossel (Sorbonne Université, CNRS), Paris, et Université d'Evry, France

luca.guidoni@u-paris.fr, marie.houssin@univ-amu.fr, jean-philippe.karr@lkb.upmc.fr



Un ion unique piégé et refroidi par laser est un système quantique isolé quasi-idéal pour des études spectroscopiques de haute précision avec de nombreuses applications en métrologie et physique fondamentale. Le confinement d'un ensemble d'ions dans des configurations contrôlées et le développement de techniques d'interrogation toujours plus sophistiquées, utilisant notamment la logique quantique, offrent de nouvelles ouvertures pour continuer cette quête à la précision ultime.

<https://doi.org/10.1051/photon/202312147>

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 spectroscopie de haute précision est un outil précieux pour la physique fondamentale, permettant de réaliser des horloges atomiques, de mesurer des constantes fondamentales ou des paramètres nucléaires, de tester le modèle standard, par exemple en étudiant la variabilité des constantes fondamentales. Cela nécessite un contrôle fin des perturbations extérieures (effet Doppler, collisions, champs électriques et magnétiques), qui peut être atteint en piégeant les ions dans un champ radiofréquence (Piège de Paul) sous ultravide et en les refroidissant. À travers différents

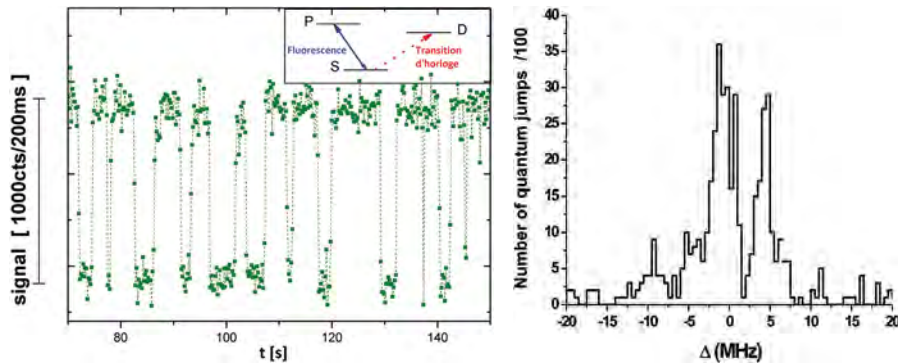
exemples, nous montrons dans cet article comment les mesures spectroscopiques sur des ions uniques, des ensembles d'ions atomiques ou moléculaires permettent d'atteindre des précisions extrêmes en constante amélioration.

L'ION UNIQUE : UN SYSTÈME MODÈLE

Les premières images par fluorescence d'ions atomiques uniques ont été obtenues au tout début des années 1980 à Heidelberg, réalisant ainsi le rêve de « voir » un atome unique isolé. Les ions, piégés sous vide par des champs électriques quadripolaires oscillants engendrés par des systèmes d'électrodes, étaient refroidis par laser

(refroidissement dit « Doppler ») à des températures de l'ordre de quelques millikelvin. L'intérêt spectroscopique et métrologique de ces systèmes a été une motivation constante pour le développement des technologies de piégeage et refroidissement. À partir d'une proposition de I. Cirac et P. Zoller en 1995, les potentialités des ions piégés pour le développement d'un ordinateur quantique ont considérablement étendu leurs domaines d'applications [1].

Du point de vue du spectroscopiste, un ion unique froid confiné sous ultravide permet d'éliminer tout phénomène d'élargissement inhomogène ou de temps de transit et de maîtriser les effets systématiques liés à ●●●



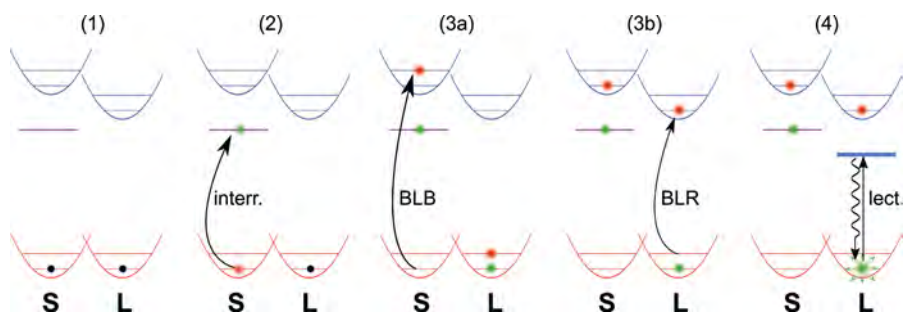
l'environnement (déplacement lumineux dû au rayonnement du corps noir, champs magnétiques et électriques résiduels...). De plus, en régime de Lamb-Dicke et de raie étroite (voir encadré), l'effet Doppler et l'effet du recul induit par le photon sont absents du spectre de la « porteuse » qui se retrouve résolue par rapport aux bandes latérales induites par le mouvement résiduel. Cela a permis le développement d'horloges à ions froids uniques dans le domaine optique qui, dans les années 2000, ont dépassé les précisions des meilleures horloges et atteignent aujourd'hui des incertitudes relatives de l'ordre de 10^{-17} (Sr^+ , Ca^+ , Hg^+) ou même quelques 10^{-18} (Yb^+). Ces horloges utilisent comme référence une transition étroite vers un état métastable à longue durée de vie ($\sim 1\text{s}$), sondée grâce à la technique de « l'électron shelving » (littéralement « mise de l'électron en étagère ») : la fluorescence d'une transition intense (souvent celle utilisée pour le refroidissement) s'éteint lorsque l'ion est dans l'état métastable (figure 1) [2]. La statistique du nombre de transitions en fonction de la fréquence du laser d'excitation permet de construire le spectre.

Même la spectroscopie de « raie large » peut tirer profit de la maîtrise des ions uniques. Le problème qui se pose alors est le recul induit par le faisceau sonde qui déforme la raie. L'effet de ce recul peut être rendu négligeable en alternant des séquences de refroidissement et d'interrogation. A titre d'exemple, dans le groupe QITE de l'Université Paris-Cité il a été possible de déterminer le centre de la transition $5S_{1/2} - 5P_{1/2}$ de l'ion Sr^+ (largeur naturelle 21.7 MHz) avec

Figure 1. À gauche, « sauts quantiques » d'un ion unique (ici, un ion calcium) par absorption d'un photon vers le niveau métastable. Lorsque l'atome est dans le cycle de refroidissement, il fluoresce (niveau haut). Lorsque l'atome est dans le niveau métastable (« shelf »), il cesse de fluorescer pendant quelques secondes (niveau bas). À droite, statistique du nombre de sauts en fonction de la fréquence du laser excitant la transition d'horloge (laboratoire PIIM).

une incertitude inférieure à 20 kHz. Cette précision a un intérêt cosmologique (le spectre des ions Mg^+ et Sr^+ sont des marqueurs dans les galaxies lointaines) et permet des mesures fines de décalages isotopiques, précieuses en physique nucléaire.

Figure 2. Étapes schématiques de la technique de spectroscopie par logique quantique. (1) Une paire d'ions est refroidie dans l'état fondamental d'un mode de vibration commun. Ce refroidissement se fait en agissant sur l'ion dit « logique » (L), l'ion d'intérêt spectroscopique (S) étant plus difficile à manipuler. (2) Un faisceau sonde « interroge » une transition très étroite de l'ion spectroscopique (transition d'horloge). En cas de succès l'électron passe dans le niveau excité (boule verte), sinon il reste dans l'état fondamental (boule rouge). (3) Comme il n'est pas possible de détecter directement l'état de l'ion S, on utilise l'état commun de vibration pour transférer cette information sur l'ion L. On effectue donc une tentative d'excitation de l'ion S sur une bande latérale bleue (BLB) d'une transition étroite auxiliaire (3a), suivie d'une tentative de « shelving » de l'ion L par une excitation de la bande latérale rouge (BLR, 3b). Ces deux étapes (3a et 3b) ne sont possibles que si l'ion S est resté dans l'état fondamental (boules rouges). (4) Une lecture de l'état de l'ion L révèle l'état initial de l'ion S. Les étapes élémentaires du transfert d'information entre ions *via* leur état commun de vibration (3a,3b) sont également à la base du fonctionnement de l'ordinateur quantique à ions piégés.



PAIRES D'IONS : REFROIDISSEMENT SYMPATHIQUE ET LOGIQUE QUANTIQUE

Un piège de Paul peut bien évidemment contenir plusieurs ions en même temps. Si ces ions sont refroidis par laser ils peuvent atteindre une température suffisamment faible pour effectuer une transition de phase qui les conduit à former un ensemble ordonné appelé « cristal de Coulomb » (figure 3). Encore plus intéressant, des ions de plusieurs espèces peuvent être piégés en même temps. Dans ce cas, même si une seule des espèces présentes est refroidie par laser, l'ensemble des ions dans le piège peut atteindre le régime cristallin : il s'agit de la méthode dite de « refroidissement sympathique » qui permet d'étendre la spectroscopie à haute résolution à des espèces impossibles à refroidir par laser.

Un cas particulièrement intéressant est celui d'une paire d'ions dont l'un possède un fort intérêt métrologique et l'autre est facilement manipulable par laser (refroidissement possible dans l'état fondamental de vibration du piège, voir encart). En 2005 à Boulder, une nouvelle technique appelée

« spectroscopie par logique quantique » (figure 2) a été inventée et démontrée [3], ouvrant la voie à des horloges optiques d'une précision inégalée. En se basant sur cette idée, le NIST de Boulder a construit en 2007 la meilleure horloge de l'époque à partir d'une paire Aluminium (spectroscopie) /Béryllium (manipulation), dont une

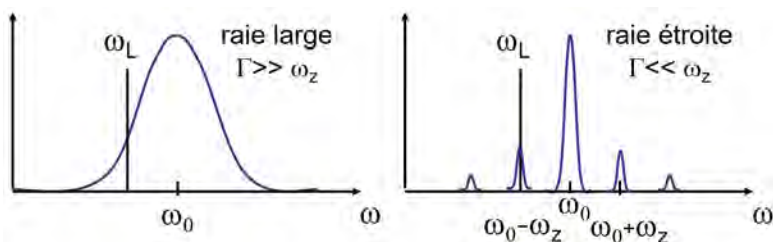
version améliorée détient actuellement le record d'exactitude (9.4×10^{-19}).

GRANDS NOMBRES D'IONS

Ne gagnerait-on pas à utiliser des ions piégés en grand nombre pour améliorer la statistique des mesures ? Cependant, le refroidissement dans l'état ●●●

LE RÉGIME DE LAMB-DICKE

Dans un piège de Paul typique, le mouvement d'un ion peut être décrit comme la superposition d'un mouvement d'oscillateur harmonique dit « macromouvement » à une fréquence de l'ordre de la dizaine de kHz à quelques MHz et d'une oscillation rapide de faible amplitude à la fréquence du champ radiofréquence de piégeage appelée « micromouvement ». Le mouvement de l'ion induit via l'effet Doppler une modulation de la fréquence d'une onde électromagnétique incidente. Pour une transition atomique (pulsation ω_0) de largeur bien inférieure à la fréquence de modulation, le spectre est alors constitué d'une porteuse à ω_0 et de bandes latérales écartées de n fois la fréquence du mouvement. La porteuse n'est pas élargie par l'effet Doppler du premier ordre permettant une résolution uniquement de la raie et par le temps d'interrogation.



Dans un modèle quantique, le macro-mouvement le long de l'axe du piège est bien décrit par l'Hamiltonien d'un oscillateur harmonique quantique d'énergies propres $E_n = (n + 1/2)\hbar\omega_z$. Si l'énergie de recul $E_r = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$ transmise

à l'ion de masse m lors de l'absorption ou l'émission d'un photon de l'onde laser (vecteur d'onde k) est faible devant $\hbar\omega_z$, les transitions modifiant l'état de mouvement de l'ion (correspondant aux bandes latérales) sont faibles : c'est le régime de Lamb-Dicke. Soit η tel que $\eta^2 = \frac{E_r}{\hbar\omega_z}$, on a $\eta^2 \ll 1$.

Le paramètre de Lamb-Dicke η est aussi défini comme $\eta = kz_0 = \frac{2\pi}{\lambda} z_0$ où λ est la longueur d'onde du laser et $z_0 = \sqrt{\frac{\hbar}{2m\omega_z}}$ l'extension de la fonction d'onde dans l'état fondamental du mouvement. La condition précédente devient $\eta = kz_0 \ll 1$ soit $z_0 \ll \lambda/2\pi$.

L'amplitude de mouvement typique d'un ion refroidi par refroidissement Doppler étant de l'ordre du micromètre, cette condition est beaucoup plus facile à atteindre pour des transitions dans le domaine micro-onde ou térahertz où les longueurs d'onde sont respectivement de l'ordre du centimètre ou millimètre que dans le domaine optique. Cela a permis de réaliser, avec des nuages d'ions, des étalons de fréquence micro-onde compétitifs avec les meilleures horloges à césium.

Dans le régime où les bandes latérales sont bien résolues, il est possible d'appliquer la technique du « refroidissement par bande latérale » (sideband cooling). Au moyen d'une excitation laser de la première bande « rouge » à $\omega_l = \omega_0 - \omega_z$, l'ion peut être refroidi au-delà de la limite du refroidissement Doppler jusqu'à l'état fondamental de mouvement, ouvrant la voie aux manipulations quantiques.



SPECTROSCOPIE NIR / MIR

SPECTROSCOPIE MIR EN TEMPS RÉEL

- ▲ Gamme spectrale : 2-5μm/7-12μm
- ▲ 400 Hz à 130 kHz
- ▲ Sensibilité 5 pW/nm
- ▲ Résolution 2.5 cm⁻¹



SPECTROMÈTRE NIR COMPACT À TRANSFORMÉE DE FOURIER

- ▲ Gamme spectrale : 900-2600 nm (360 nm à 12 μm suivant modèles)
- ▲ Résolution 8 cm⁻¹



SPECTROMÈTRE PORTABLE NIR

- ▲ Gamme spectrale : 900-2500 nm
- ▲ Source intégrée



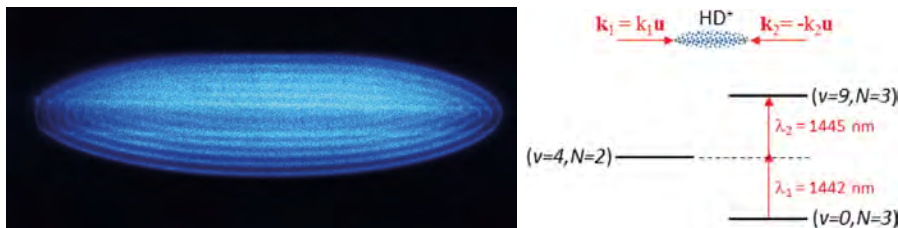


Figure 3. À gauche, cristal d'ions Be^+ piégés et refroidis par laser, imagé par une caméra EMCCD sensible à l'ultraviolet (Laboratoire Kastler Brossel). Les ions Be^+ sont visibles car ils absorbent et réémettent constamment des photons du laser de refroidissement ($\lambda = 313 \text{ nm}$). La zone horizontale sombre au centre de l'image indique la présence d'ions d'autres espèces, ici H_2^+ . À droite, schéma d'excitation d'une transition vibrationnelle de HD^+ par deux photons quasi-dégénérés contra-propageants (ν et N sont les nombres quantiques vibrationnel et rotationnel). Les longueurs d'onde λ_1 , λ_2 sont ajustées pour être à quasi-résonance avec un état ro-vibrationnel intermédiaire afin d'exalter la transition. Le vecteur d'onde total des deux photons étant $\mathbf{k} = \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = (k_1 - k_2) \mathbf{u}$, on peut associer à la transition une longueur d'onde effective $\lambda_{\text{eff}} = 1/(\lambda_1^{-1} - \lambda_2^{-1}) \sim 700 \mu\text{m}$ pour laquelle la condition de Lamb-Dicke est facilement satisfaite.

fondamental du mouvement devient problématique au-delà d'une dizaine d'ions, le nombre de modes à refroidir étant trop grand. Il faut donc se contenter du refroidissement Doppler rendant plus difficile la réalisation du régime Lamb-Dicke. La spectroscopie à très haute résolution sur des ensembles d'ions est pour cette raison restée longtemps limitée aux domaines RF et micro-ondes.

Les progrès récents de la spectroscopie des ions moléculaires hydrogène (H_2^+ , HD^+ ...) illustrent différentes méthodes par lesquelles il est possible d'atteindre le régime Lamb-Dicke y compris pour des transitions dans le domaine optique. Ces molécules sont les plus simples et leurs niveaux d'énergie sont calculables très précisément. Les fréquences mesurées de leurs transitions ro-vibrationnelles peuvent être comparées aux prédictions théoriques pour extraire les valeurs de constantes fondamentales, en particulier le rapport des masses du proton et de l'électron m_p/m_e . La structure complexe des niveaux d'énergie moléculaires rend cependant difficile la manipulation de ces ions. Sauf exception, ils ne peuvent pas être refroidis directement par laser et doivent être refroidis sympathiquement *via* des ions atomiques. De plus, pour des ensembles d'ions, il faut recourir à une

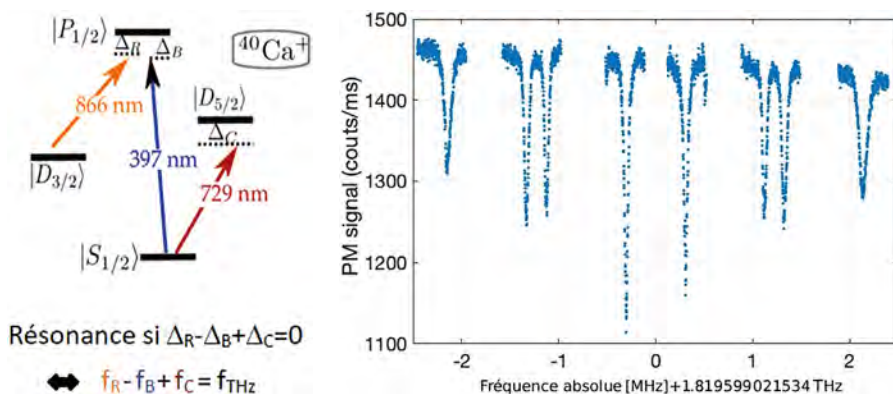
détection destructive par photodissociation sélective de l'état excité. Le signal est alors une perte d'ions. Pour la détecter, on transfère de l'énergie aux ions moléculaires par une excitation résonnante de leur mouvement *via* un potentiel électrique oscillant. Cela chauffe sympathiquement les ions atomiques refroidis par laser et induit une variation de leur fluorescence, d'autant plus importante que le nombre d'ions moléculaires est grand.

Plusieurs mesures ont été effectuées sur des ensembles d'ions HD^+

refroidis sympathiquement par Be^+ dans un piège linéaire (figure 3). Des transitions allant du domaine TéraHertz (rotationnelle) à l'infrarouge proche (ro-vibrationnelles) ont été mesurées dans le régime de Lamb-Dicke, à Düsseldorf, en exploitant le fort confinement radial des ions. Une autre solution est la spectroscopie à deux photons : lors de l'absorption de deux photons contra-propageants de même fréquence, le décalage Doppler du premier ordre est éliminé. L'expérience en cours au laboratoire Kastler Brossel (Paris) utilise ce principe pour sonder une transition vibrationnelle de H_2^+ . Une autre configuration à deux photons quasi-dégénérés (figure 3), a été démontrée dans le cas de HD^+ à Amsterdam en collaboration avec le LKB [4]. Cette méthode a mené à la mesure spectroscopique la plus précise à ce jour dans les ions moléculaires hydrogènes (incertitude relative de quelques 10^{-12}). Tous ces résultats contribueront à améliorer la détermination de m_p/m_e .

Une autre technique de spectroscopie multiphotonique permettant de s'affranchir de l'effet Doppler du premier ordre utilise le piégeage cohérent de population dans un état noir. Au laboratoire PIIM à Marseille, plusieurs centaines d'ions Ca^+ piégés sont sondés par trois lasers verrouillés en phase par l'intermédiaire d'un peigne de fréquence optique, donnant accès à des raies spectrales très contrastées. La combinaison des fréquences des trois lasers permet de construire une référence de fréquence à 1,8 THz (figure 4).

Figure 4 : À gauche, un schéma de niveaux de l'ion calcium. Si la condition de résonance est satisfaite, les ions sont dans une superposition des 2 états « D » métastables et la fluorescence décroît. À droite, composantes Zeeman d'un spectre typique de résonance noire (laboratoire PIIM).



Résonance si $\Delta_R - \Delta_B + \Delta_C = 0$

$$\leftrightarrow f_R - f_B + f_C = f_{\text{THz}}$$

Laser à diode à cavité miniature fibrée

633 nm - 1908 nm



TO39 ou Butterfly

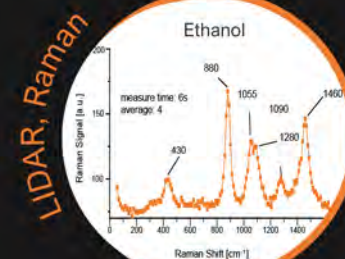
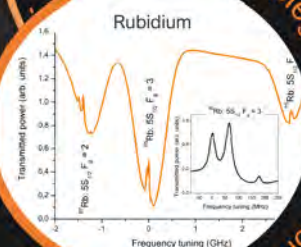
Ultra fin

largeur de raie typ. < 15 kHz

Ultra stable

cavité monolithique compacte

Refroidissement, piègeage atomes/ions



+ Condensat de Bose Einstein
+ Spectroscopie d'absorption

 Sacher

Distribution exclusive en France
par IDIL : info@idil.fr

VERS DES HORLOGES MULTI-IONS

À mesure que la précision des horloges à ions s'améliore, le problème de la faiblesse du signal, qui nécessite des temps de moyennage extrêmement longs pour que la résolution des mesures atteigne la limite imposée par l'exactitude de l'horloge, se pose avec de plus en plus d'acuité. De nombreux efforts sont donc déployés actuellement pour augmenter le nombre d'ions tout en maintenant un contrôle très précis des effets systématiques. Par exemple, un réseau de pièges permettant de confiner une centaine d'ions, sous forme de plusieurs chaînes de quelques ions, a été fabriqué. Est-il possible d'aller encore plus loin et de réaliser une horloge basée sur un cristal tridimensionnel de quelques milliers d'ions (figure 3) ? Une telle configuration a longtemps été considérée comme incompatible avec le niveau de précision ultime d'une horloge, car les ions situés à l'écart de l'axe de symétrie du piège (sur lequel le champ RF de piégeage s'annule) subissent un excès de micromouvement qui entraîne un décalage de fréquence *via* l'effet Doppler du second ordre. Il a cependant été remarqué que si la transition utilisée possède une polarisabilité différentielle négative (c'est-à-dire que la polarisabilité de l'état excité est inférieure à celle de l'état fondamental), l'effet Stark induit par le même champ RF peut compenser presque parfaitement l'effet Doppler du second ordre, à condition de choisir une valeur « magique » de la fréquence du champ de piégeage. Les ions possédant des transitions de polarisabilité différentielle négative sont rares, mais un tel ion possédant des caractéristiques

favorables pour le développement d'une horloge, Sn^{2+} , a récemment été identifié.

Au-delà du nombre d'ions, on peut imaginer d'augmenter le nombre d'horloges. Le développement de réseaux de liens par fibre optique permettant de transmettre un signal ultrastable sur de longues distances, comme T-REFIMEVE en France, rend désormais possibles des comparaisons directes entre horloges distantes de plusieurs centaines voire milliers de kilomètres. De telles comparaisons sont utilisées pour des tests de physique fondamentale, et pourraient servir de base pour définir une échelle de temps internationale en temps réel. Leur précision peut être améliorée grâce à l'intrication quantique, ce qui a mené à proposer la réalisation d'un « réseau quantique » d'horloges à l'échelle mondiale, dont une brique élémentaire a été démontrée récemment en intriquant deux horloges à ion unique Sr^+ [5].

CONCLUSION

De l'ion unique aux ensembles, les ions piégés refroidis par laser sont des systèmes privilégiés en spectroscopie de haute précision. Des techniques variées, comme l'interrogation multiphotonique ou par logique quantique ont été développées dans les deux dernières décennies, repoussant les limites de précision et élargissant la gamme des fréquences accessibles (du térahertz à l'ultraviolet) et les types d'ions étudiés (ions moléculaires, ions multichargés). Une voie de recherche actuelle consiste à améliorer la statistique des mesures en augmentant le nombre d'ions interrogés ou en exploitant l'intrication quantique. ●

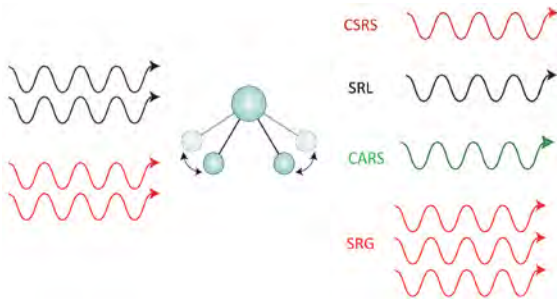
RÉFÉRENCES

- [1] R. Blatt and D. J. Wineland, *Nature* **453**, 1008 (2008), doi: 10.1038/nature07125
- [2] W. Nagourney *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **56**, 2797 (1986), doi: 10.1103/PhysRevLett.56.2797; Th. Sauter *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **57**, 1696 (1986), doi: 10.1103/PhysRevLett.57.1696; J. C. Bergquist *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **57**, 1699 (1986), doi: 10.1103/PhysRevLett.57.1699
- [3] P. O. Schmidt *et al.*, *Science* **309**, 749 (2005), doi: 10.1126/science.1114375
- [4] S. Patra *et al.*, *Science* **369**, 1238 (2020), doi: 10.1126/science.aba0453 (arXiv:2204.10674)
- [5] B. C. Nichol *et al.*, *Nature* **609**, 689 (2022), doi: 10.1038/s41586-022-05088-z (arXiv:2111.10336)

COMPRENDRE LES PROCESSUS RAMAN COHÉRENTS

Hervé RIGNEAULT et Sandro HEUKE

Aix Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, Marseille, France
 *herve.rigneault@fresnel.fr ; sandro.heuke@fresnel.fr



Nous présentons les bases physiques pour comprendre les processus Raman cohérents qui sont à l'origine de nombreuses applications en spectroscopie et en imagerie. Ces processus de mélange d'ondes sont résonnants avec les niveaux vibratoires des molécules et rapportent une information chimique sur la matière sondée par les ondes optiques. Ils se développent dans les domaines fréquentiel et spatial avec des spécificités que nous précisons.

<https://doi.org/10.1051/photon/202312152>

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'effet Raman stimulé a été découvert par Eckhardt en 1962 [1] juste après la démonstration expérimentale du premier laser à Ruby en 1960. En 1965, Maker et Terhune rapportèrent un mélange à quatre-ondes qui était résonnant avec une vibration moléculaire, ils venaient de découvrir le processus CARS (coherent anti-Stokes Raman scattering). Depuis cette date, les processus Raman cohérents ont été beaucoup utilisés en spectroscopie [2] pour étudier les niveaux vibrationnels dans des gaz, et plus récemment en microscopie pour réaliser des images de composés chimiques dans des contextes aussi variés que les sciences de matériaux, la pharmacologie, la biologie et

la médecine [3]. Le but de cet article est de présenter les bases physiques des effets Raman cohérents.

LES PROCESSUS RAMAN COHÉRENTS : ASPECT FRÉQUENTIEL

Contrairement à l'absorption infra-rouge qui permet d'adresser directement les niveaux vibratoires des molécules par absorption direct de rayonnement dans la gamme de longueur d'ondes $50\mu\text{m} - 3\mu\text{m}$ [300cm^{-1} , 3000cm^{-1}], les processus Raman cohérents utilisent une différence de fréquence entre deux ondes optiques visible ou moyen infrarouge pour entrer en résonance avec les modes vibratoires des molécules. La figure 1 a précisé la situation expérimentale où deux ondes optiques

dont le mode vibratoire est Ω_R . La première onde, dite pompe, de fréquence $\omega_p = \omega_1$ interagit avec la deuxième onde, dite Stokes, dont la fréquence vérifie $\omega_s = \omega_1 - \Omega_R$; de telle sorte que la différence de fréquences entre les ondes pompe et Stokes soit égale au mode vibratoire moléculaire, $\omega_p - \omega_s = \Omega_R$. Cette condition de résonance est nécessaire pour activer un ensemble de mélanges à quatre ondes faisant intervenir la matière par l'intermédiaire de la susceptibilité non linéaire d'ordre trois $\chi^{(3)}$. Par exemple, dans un des processus dit CARS, pour 'coherent anti-Stokes Raman scattering', le mélange d'onde active une polarisation non linéaire $\vec{P}^{(3)}(\omega_{\text{CARS}}) = \chi^{(3)}(\omega_{\text{CARS}}; \omega_p, \omega_p, -\omega_s) : \vec{E}_p \vec{E}_p \vec{E}_s^*$ qui rayonne à une nouvelle fréquence $\omega_{\text{CARS}} = \omega_p + \omega_p - \omega_s$ pour

généraliser le champ CARS. Dans l'expression ci-dessus, $\chi^{(3)}$ est un tenseur qui dépend de la symétrie de la vibration et les composantes de la polarisation induite sont données par $P_i^{(3)} = \sum_{j,k,l} \chi_{i,j,k,l}^{(3)} E_{p_j} E_{p_k} E_{s_l}^*$. Dans le processus CSRS, pour 'coherent Stokes Raman scattering', le mélange d'onde active la polarisation non linéaire $\vec{P}^{(3)}(\omega_{CSRS}) = \chi^{(3)}(\omega_{CSRS}; \omega_s, \omega_s, -\omega_p) : \vec{E}_s \vec{E}_s \vec{E}_p^*$ qui rayonne à $\omega_{CSRS} = \omega_s + \omega_s - \omega_p$. Les processus CARS et CSRS rayonnent ainsi à des fréquences différentes des ondes incidentes pompe et Stokes. Ils sont séparés spectralement des ondes pompe et Stokes de la fréquence vibratoire moléculaire Ω_R (voir Fig. 1 b).

Les processus SRS, pour 'stimulated Raman scattering' sont

différents car ils affectent les ondes incidentes pompe et Stokes en modifiant leur intensité. Le processus SRG, pour 'stimulated Raman gain' active la polarisation non linéaire $\vec{P}^{(3)}(\omega_{SRG}) = \chi^{(3)}(\omega_{SRG}; \omega_p, -\omega_p, \omega_s) : \vec{E}_p \vec{E}_s \vec{E}_p^*$ qui rayonne à $\omega_s = \omega_p - \omega_p + \omega_p$. On peut montrer que le champ SRG rayonné interfère constructivement avec le champ Stokes incident pour en augmenter son intensité, d'où la terminologie 'stimulated Raman gain' (voir Fig. 1 b). Le processus SRL, pour 'stimulated Raman loss' est symétrique du processus SRG. Il active la polarisation $\vec{P}^{(3)}(\omega_{SRL}) = \chi^{(3)}(\omega_{SRL}; \omega_s, -\omega_s, \omega_p) : \vec{E}_s \vec{E}_p \vec{E}_s^*$ qui rayonne à $\omega_p = \omega_s - \omega_s + \omega_p$. On peut montrer que le champ SRL rayonné interfère de manière destructive avec le champ pompe

incident pour en diminuer son intensité, d'où la terminologie 'stimulated Raman loss' (voir Fig. 1 b). L'encart 1 précise la génération des polarisations non linéaires dans les processus CARS, CSRS, SRG et SRL dans le cadre d'un modèle classique. Le lecteur trouvera une présentation plus complète dans [4].

LES PROCESSUS RAMAN COHÉRENTS : ASPECT SPATIAL

Pour qu'ils se développent spatialement, les processus non linéaires doivent assurer une vitesse de phase égale entre les polarisations induites et les champs optiques générés. Dans le processus CARS par exemple, la polarisation non linéaire $\vec{P}^{(3)}(\omega_{CARS}) = \chi^{(3)}(\omega_{CARS}; \omega_p, \omega_p, -\omega_s) : \vec{E}_p \vec{E}_p \vec{E}_s^*$, se propage avec le vecteur d'onde $2\vec{k}_p - \vec{k}_s$ alors que l'onde CARS se propage avec le vecteur d'onde

$$\vec{k}_{CARS} = \frac{n_{CARS} \omega_{CARS}}{c} \cdot \vec{e}_{CARS}. \text{ Il est donc}$$

important d'assurer $\Delta\vec{k} = 2\vec{k}_p - \vec{k}_s - \vec{k}_{CARS} = \vec{0}$ pour que les champs CARS générés puissent interférer constructivement. Cette condition est connue sous le nom d'accord de phase (Voir encart 2). Du fait de la dispersion

$$(\vec{k}_p = \frac{n_p \omega_p}{c} \cdot \vec{e}_p ; \vec{k}_s = \frac{n_s \omega_s}{c} \cdot \vec{e}_s), \text{ cette}$$

condition n'est pas forcément réalisée pour des ondes pompe, Stokes et CARS se propageant de façon colinéaire (Fig. 2 a) et des conditions 'non colinéaires' ont pu être mises en œuvre pour des applications de spectroscopie.

Généralisons maintenant les considérations ci-dessus et considérons que l'échantillon est constitué d'un ensemble de fréquences spatiales \vec{K} . En optique linéaire, le vecteur d'onde diffracté \vec{k}_{diff} est relié au vecteur d'onde incident \vec{k}_{inc} par la loi $\vec{k}_{diff} = \vec{k}_{inc} + \vec{K}$, c'est en particulier ce qui donne lieu à la loi des réseaux de diffraction. De la même façon, le vecteur \vec{k}_{CARS} est diffracté par l'échantillon, présentant des fréquences spatiales non nulles, et la condition d'accord de phase devient alors $\Delta\vec{k} = 2\vec{k}_p - \vec{k}_s - \vec{k}_{CARS} - \vec{K} = \vec{0}$. ●●●

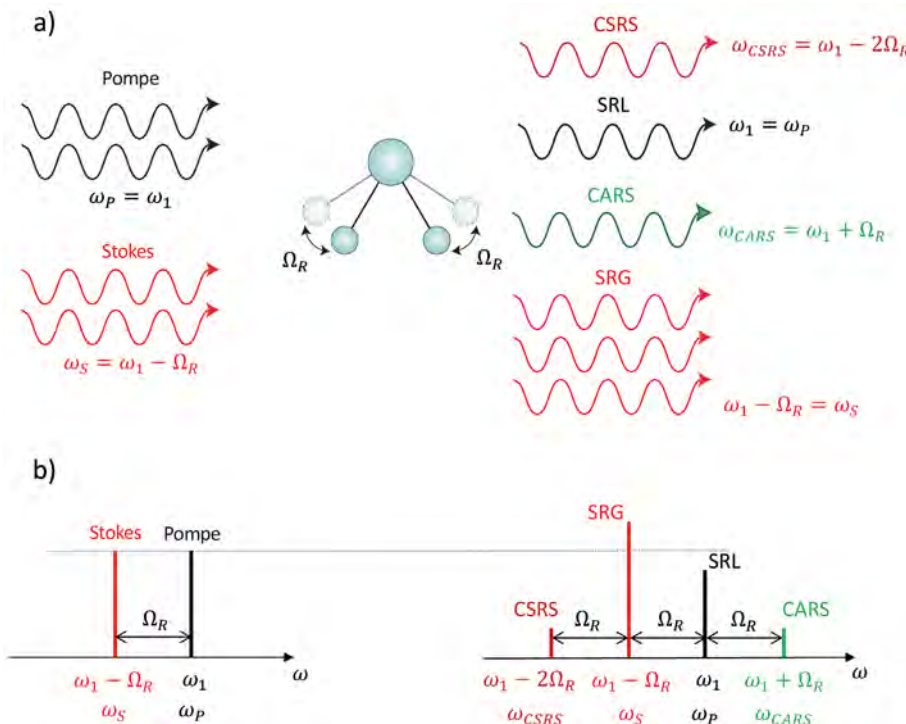


Figure 1. Les processus Raman cohérents. (a) Deux ondes incidentes dites pompe et Stokes, dont la différence de fréquences optiques est Ω_R , interagissent par 'mélange à quatre ondes' avec une liaison chimique de fréquence vibrationnelle Ω_R et donnent naissance aux processus Raman cohérents : CSRS (coherent Stokes Raman scattering), SRG (stimulated Raman gain), SRL (stimulated Raman loss) et CARS (coherent anti-Stokes Raman scattering) ; (b) représentation dans l'espace des fréquences, faisceaux incidents (gauche) et générés (droite). Le processus SRG crée du gain sur le faisceau Stokes alors que le processus SRL crée des pertes sur le faisceau pompe, les processus CSRS et CARS sont de nouvelles radiations générées dans le mélange d'onde, l'écart en fréquence Ω_R , est constant entre les ondes CSRS, SRG, SRL et CARS.

DIFFUSION RAMAN COHÉRENTE : ASPECT FRÉQUENTIEL

Considérons deux ondes planes, dénotées pompe et Stokes (Fig. 1 a), de fréquence respectives ω_p et ω_s , qui interagissent avec des molécules de vibration moléculaire Ω_r . Le champ électrique total peut s'écrire $E(z, t) = A_p e^{i(k_p z - \omega_p t)} + A_s e^{i(k_s z - \omega_s t)} + c.c.$, où $c.c.$ est le complexe conjugué.

L'interférence entre ces deux champs génère un battement à la fréquence $\Omega = \omega_p - \omega_s$,

$$\langle E^2(z, t) \rangle = A_p A_s^* e^{i((k_p - k_s)z - \Omega t)} + c.c. \quad (1)$$

où $\langle \rangle$ est la moyenne temporelle sur une période optique. Si la différence de fréquence $\Omega = \omega_p - \omega_s$ est telle que $\Omega = \Omega_r$, le mode vibratoire moléculaire entre en résonance avec le battement ondulatoire optique.

Considérons maintenant une molécule diatomique dont les atomes sont distants de $x_0 + x(t)$ où $x(t)$ est l'élongation. Dans un modèle classique, la vibration moléculaire peut être décrite par un oscillateur harmonique forcé par le champ optique,

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\gamma \frac{dx}{dt} + \Omega_r^2 x = \frac{F(t)}{\mu} \quad (2)$$

L'énergie nécessaire pour créer un moment dipolaire $\vec{p}(t) = \epsilon_0 \alpha(t) \vec{E}(t)$ est donnée par

$$W = \frac{1}{2} \langle \vec{p}(z, t) \cdot \vec{E}(z, t) \rangle = \frac{1}{2} \epsilon_0 \alpha \langle E^2(z, t) \rangle \quad (3)$$

En supposant que la polarisabilité $\alpha(t)$ est liée à l'élongation $x(t)$ par $\alpha(t) = \alpha_0 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial x}\right)_0 x(t)$, en insérant (1) dans (2) on obtient la force d'excitation des deux ondes pompe et Stokes sur la molécule diatomique,

$$F(t) = \frac{dW}{dx} = \epsilon_0 \left(\frac{\partial \alpha}{\partial x}\right)_0 \left[A_p A_s^* e^{i((k_p - k_s)z - \Omega t)} + c.c. \right] \quad (4)$$

Pour résoudre (2), considérant la force (4), nous recherchons des solutions sous la forme

$$x(z, t) = x(\Omega) e^{i((k_p - k_s)z - \Omega t)} + c.c.$$

Près de la résonance, l'amplitude de la vibration est donnée par [4]

$$x(\Omega) = \frac{-(\epsilon_0) \left(\frac{\partial \alpha}{\partial x}\right)_0 A_p A_s^*}{(\Omega - \Omega_r) + i\gamma} \quad (5)$$

Si le battement entre les champs optiques est tel que $\Omega = \Omega_r$, l'amplitude de vibration moléculaire $x(\Omega_r)$ devient importante et les champs excitateurs pompe et Stokes vont induire des polarisations non linéaires qui vont être spécifiques des résonances vibratoires moléculaires.

Si N est la densité moléculaire, la polarisation induite dans le milieu est donnée par

$$P(z, t) = N_p(z, t) = N \epsilon_0 \left[\alpha_0 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial x}\right)_0 x(z, t) \right] E(z, t) \quad (6)$$

qui est la somme d'une polarisation linéaire $P^L(z, t) = N \epsilon_0 \alpha_0 E(z, t)$ et d'une polarisation non linéaire

$$P^{NL}(z, t) = N \epsilon_0 \left(\frac{\partial \alpha}{\partial x}\right)_0 \left[x(\Omega) e^{i((k_p - k_s)z - \Omega t)} + c.c. \right] \times \left[A_p e^{i(k_p z - \omega_p t)z - \Omega t} + A_s e^{i(k_s z - \omega_s t)} + c.c. \right] \quad (7)$$

En développant $P^{NL}(z, t)$, il apparaît que la polarisation non linéaire rayonne à quatre fréquences différentes : deux nouvelles fréquences $\omega_{CARS} = 2\omega_p - \omega_s$ et $\omega_{CSRS} = 2\omega_s - \omega_p$ ainsi que dans les fréquences des champs pompe et Stokes incidents ω_p et ω_s . La polarisation non linéaire peut ainsi s'écrire $P^{NL}(z, t) = P(\omega_{CARS}) e^{-i\omega_{CARS} t} + P(\omega_{CSRS}) e^{-i\omega_{CSRS} t} + P(\omega_p) e^{-i\omega_p t} + P(\omega_s) e^{-i\omega_s t}$, où les amplitudes complexes $P(\omega_{CARS})$, $P(\omega_{CSRS})$, $P(\omega_p)$ et $P(\omega_s)$ sont données par

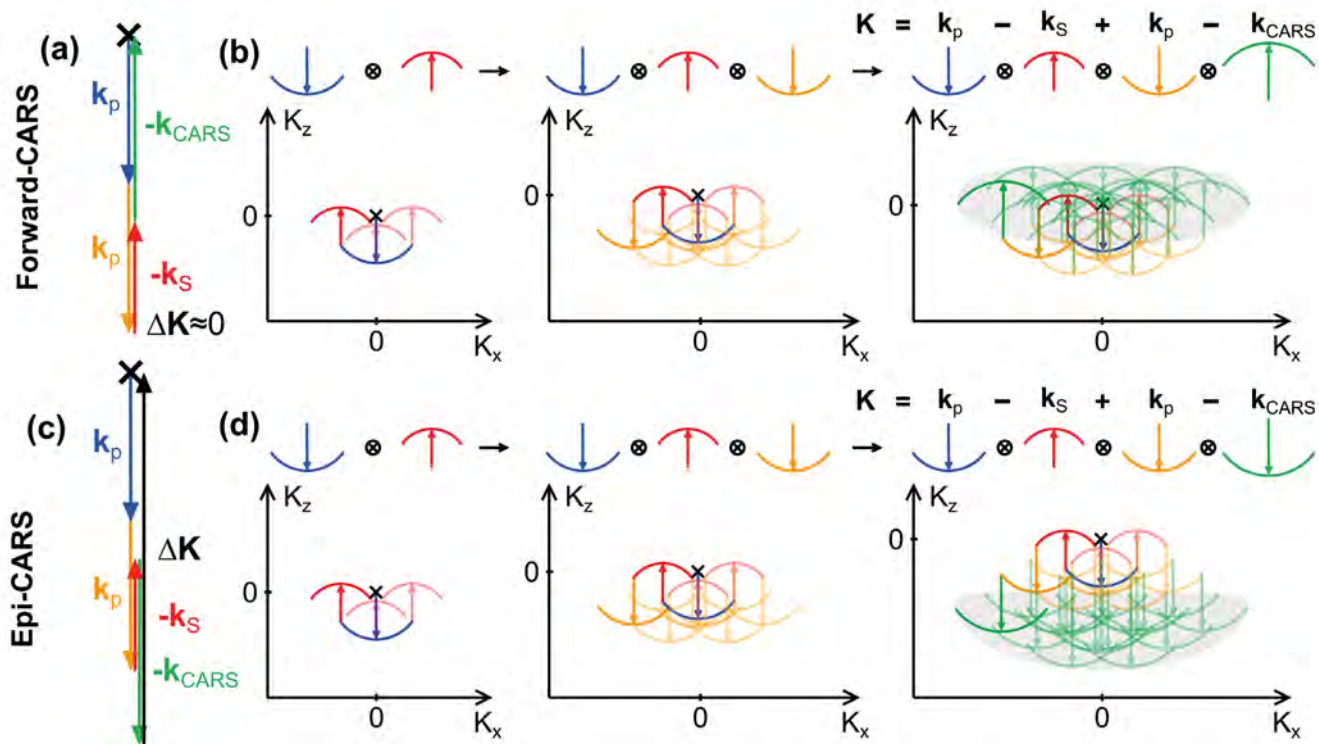
$$P(\omega_{CARS}) = N \epsilon_0 \left(\frac{\partial \alpha}{\partial x}\right)_0 x(\Omega) A_p e^{i(2k_p - k_s)z}, \text{ associé au processus CARS (coherent anti-Stokes Raman scattering)}$$

$$P(\omega_{CSRS}) = N \epsilon_0 \left(\frac{\partial \alpha}{\partial x}\right)_0 x^*(\Omega) A_s e^{i(2k_s - k_p)z}, \text{ associé au processus CSRS (coherent Stokes Raman scattering)}$$

$$P(\omega_p) = N \epsilon_0 \left(\frac{\partial \alpha}{\partial x}\right)_0 x(\Omega) A_s e^{ik_p z}, \text{ associé au processus SRL (stimulated Raman loss)}$$

$$P(\omega_s) = N \epsilon_0 \left(\frac{\partial \alpha}{\partial x}\right)_0 x^*(\Omega) A_p e^{ik_s z}, \text{ associé au processus SRG (stimulated Raman gain)}$$

Alors que les polarisations induites $P(\omega_{CARS})$ et $P(\omega_{CSRS})$ donnent lieu à de nouvelles radiations, on peut montrer [4] que les polarisations induites $P(\omega_p)$ et $P(\omega_s)$ donnent lieu à des champs optiques qui interfèrent respectivement de manière destructive et constructive avec les champs incidents pompe (ω_p) et Stokes (ω_s), d'où la terminologie de 'stimulated Raman loss - SRL' et 'stimulated Raman gain - SRG' (voir Fig. 1 a et b).



En d'autres termes, il est possible de sonder les fréquences spatiales de l'échantillon qui vérifient $\vec{K} = 2\vec{k}_p - \vec{k}_s - \vec{k}_{CARS}$. Il apparaît immédiatement que la condition $\Delta\vec{k} = 2\vec{k}_p - \vec{k}_s - \vec{k}_{CARS} = \vec{0}$ telle que représentée Fig. 2 a pour des ondes pompe et Stokes colinéaires se limite à sonder la fréquence nulle de l'échantillon $\vec{K} = \vec{0}$. *A contrario* dans une configuration de microscopie où les ondes pompe et Stokes sont focalisées et arrivent dans un ensemble de directions définies par l'ouverture numérique de l'objectif, il est possible de sonder un support de \vec{K} qui s'étend bien au-delà de la fréquence nulle (Fig. 2 b). C'est la raison pour laquelle les images de microscopie CARS révèlent des détails de l'échantillon. Considérons maintenant le cas où l'on cherche à détecter le signal CARS en direction arrière, c'est-à-dire dans une direction opposée au champ incident. Le désaccord de phase devient alors $\Delta\vec{k} = 2\vec{k}_p - \vec{k}_s + \vec{k}_{CARS}$, il apparaît immédiatement qu'il est important (Fig. 2 c), rendant ainsi très inefficace

Figure 2. Accord de phase pour le processus CARS (les faisceaux pompe et Stokes sont choisis arbitrairement avec \vec{k}_p et \vec{k}_s qui pointent vers le bas). (a) Cas où les ondes pompe et Stokes sont colinéaires et que la génération du signal CARS s'opère vers l'avant (dans ce cas $-\vec{k}_{CARS}$ pointe vers le haut), on constate qu'à la dispersion près $\Delta\vec{k} = 2\vec{k}_p - \vec{k}_s - \vec{k}_{CARS} \approx \vec{0}$; (b) cas de la microscopie CARS où les ondes pompe et Stokes sont focalisées et arrivent avec plusieurs incidences (dans ce cas les extrémités des vecteurs \vec{k} décrivent des arcs de cercles), on construit dans l'espace des \vec{K} de l'échantillon les points qui vérifient $\vec{K} = \vec{k}_p - \vec{k}_s + \vec{k}_p - \vec{k}_{CARS} = 2\vec{k}_p + \vec{k}_s - \vec{k}_{CARS}$. On peut constater que ces points délimitent une région (partie grisée) englobant le point $\vec{K} = \vec{0}$. En détection vers l'avant, la microscopie CARS permet ainsi d'imager un échantillon en révélant son contenu fréquentiel; (c) cas où les ondes pompe et Stokes sont colinéaires et que la génération du signal CARS s'opère vers l'arrière (Epi-CARS) (dans ce cas $-\vec{k}_{CARS}$ pointe vers le bas), on constate que l'accord de phase n'est pas réalisé $\Delta\vec{k} = 2\vec{k}_p - \vec{k}_s - \vec{k}_{CARS} \neq \vec{0}$, il n'y a donc pas d'émission CARS vers l'arrière pour un échantillon homogène; (d) cas de la microscopie, les points de l'espace des \vec{K} de l'échantillon qui vérifient $\vec{K} = \vec{k}_p - \vec{k}_s + \vec{k}_p - \vec{k}_{CARS}$ délimitent une région qui n'englobe pas le point $\vec{K} = \vec{0}$ et qui se situe dans une zone nécessitant des grands K_z , ainsi seul les échantillons présentant des hautes fréquences suivant z peuvent être détectés en Epi-CARS.

la génération du signal CARS 'vers l'arrière'. Dans une configuration de microscopie, on voit que seules les hautes fréquences spatiales de l'objet vont pouvoir être sondées, ce qui explique pourquoi seuls les petits objets (ou les échantillons présentant une périodicité suivant la direction z) peuvent donner un signal CARS en détection arrière (Fig. 2d). Il est intéressant de noter que le processus CSRS, même s'il relève des

mêmes considérations que le signal CARS peut assurer $\Delta\vec{k} = \vec{0}$ pour une détection arrière si les ondes pompe et Stokes ont des incidences très inclinées, le lecteur intéressé pourra se reporter à [5]. Pour finir il est important de noter que les processus SRS (SRG et SRL) qui rayonnent à la fréquence des ondes incidentes assurent toujours une interférence constructive entre les ondes générées, $\Delta\vec{k} = \vec{k}_p - \vec{k}_p - \vec{k}_s + \vec{k}_s = \vec{0}$ ●●●

pour un échantillon homogène $\vec{K} = 0$. Pour un échantillon non homogène ($\vec{K} \neq 0$), seules les ondes générées par les polarisations non linéaires $\vec{P}^{(3)}(\omega_{SRG})$ et $\vec{P}^{(3)}(\omega_{SRL})$ et diffractées par l'échantillon dans des directions colinéaires avec les champs pompe et Stokes incidents vont bénéficier de l'amplification homodyne et donner lieu à une variation d'intensité dans les champs pompe et Stokes (Fig. 1 b).

CONCLUSION

Les processus Raman cohérents sont à l'origine de nombreux développements méthodologiques et instrumentaux pour des applications en spectroscopie et en microscopie [3]. Nous avons présenté ici de façon concise les bases physiques de leur génération dans les domaines fréquentiel et spatial. Le lecteur intéressé pourra trouver une description plus détaillée dans les références [4,5]. ●

RÉFÉRENCES

- [1] G. Eckhardt, Phys. Rev. Lett. **9**, 455 (1962).
- [2] N. Bloembergen, Am. J. Phys. **35**, 989 (1967)
- [3] H. Rigneault, Photoniques **96**, 18 (2019)
- [4] H. Rigneault *et al.*, APL Photonics **3**, 091101 (2018)
- [5] S. Heuke *et al.*, Nat. Commun. **14**, 3337 (2023)

DIFFUSION RAMAN COHÉRENTE : ASPECT SPATIAL

Considérons le champ CARS, $E_{CARS}(z, t) = A_{CARS} e^{i(k_{CARS}z - \omega_{CARS}t)} + c.c.$, où A_{CARS} est supposé lentement variable sur la dimension de la longueur d'onde $\lambda_{CARS} = 2\pi c / \omega_{CARS}$. L'équation de propagation du champ CARS s'écrit [4]

$$\frac{\partial A_{CARS}}{\partial z} = \frac{i\omega_{CARS}}{2n_{CARS} \epsilon_0 c} P(\omega_{CARS}) e^{-ik_{CARS}z} \tag{1}$$

où n_{CARS} est l'indice de réfraction à la fréquence ω_{AS} et $P(\omega_{CARS}) = 3\epsilon_0 \chi^{(3)}(\omega_{CARS}) A_P^2 A_S^* e^{i(2k_P - k_S)z}$. L'équation (1) peut alors s'écrire :

$$\frac{\partial A_{CARS}}{\partial z} = \frac{3i\omega_{CARS}}{2n_{CARS} c} \chi^{(3)}(\omega_{CARS}) A_P^2 A_S^* e^{-i\Delta k z} \tag{2}$$

où $\Delta k = \Delta \vec{k} \cdot \vec{e}_z = (2\vec{k}_P - \vec{k}_S - \vec{k}_{CARS}) \cdot \vec{e}_z$ est le désaccord de phase entre la polarisation non linéaire $P(\omega_{CARS})$ se propageant avec le vecteur d'onde $k_{PNL} = 2k_P - k_S$ et l'onde CARS se propageant avec le vecteur d'onde k_{CARS} . Supposons que le processus CARS se développe dans un milieu de longueur L , le champ CARS en $z=L$ s'écrit :

$$A_{CARS}(L) = \int_0^L \frac{\partial A_{CARS}}{\partial z} dz = \frac{3i\omega_{CARS}}{2n_{CARS} c} \chi^{(3)}(\omega_{CARS}) L \text{sinc}\left\{\frac{\Delta k L}{2}\right\} e^{i\frac{\Delta k L}{2}} A_P^2 A_S^* \tag{3}$$

où $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$. On déduit de (3) l'expression de l'intensité CARS :

$$I_{CARS}(L) \propto \left| \chi^{(3)}(\omega_{CARS}) \right|^2 L^2 \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k L}{2}\right) I_P^2 I_S \tag{4}$$

où l'on remarque que l'intensité CARS est générée efficacement seulement si $\Delta k L / 2\pi \ll 1$ ce qui est vérifié quand $\Delta \vec{k} = 2\vec{k}_P - \vec{k}_S - \vec{k}_{CARS} = \vec{0}$, qui est la condition d'accord de phase dans un milieu homogène.

Cette condition est sujette à la dispersion ($n_P \neq n_S \neq n_{CARS}$) qui rend différents les modules des vecteurs d'ondes pour les ondes pompe, Stokes et CARS :

$$\vec{k}_P = \frac{n_P \omega_P}{c} \cdot \vec{e}_P; \vec{k}_S = \frac{n_S \omega_S}{c} \cdot \vec{e}_S; \vec{k}_{CARS} = \frac{n_{CARS} \omega_{CARS}}{c} \cdot \vec{e}_{CARS} \tag{5}$$

Aussi il est utile de définir la longueur de cohérence non linéaire qui quantifie la longueur caractéristique du développement du signal CARS :

$$L_c = \frac{\pi}{\Delta k}$$

Quand la longueur d'interaction L est plus longue que L_c , la génération du signal CARS décroît à cause de l'interférence destructive entre les ondes CARS générées au cours de la distance L . Il est donc important de minimiser $\Delta \vec{k}$.

Laser industriel ultraviolet



Le Monaco 345-25-50 de Coherent est un laser UV 400 fs de 50 W capable de fonctionner

24 heures sur 24 et 7 jours sur 7, et permettant une découpe de haute précision dans des volumes très élevés. Ce laser délivre des impulsions d'une énergie allant jusqu'à 25 µJ à des taux de répétition allant jusqu'à 2 MHz dans l'UV, avec une largeur d'impulsion inférieure à 400 fs.

<https://www.coherent.com/news/press-releases/50w-uv-femtosecond-monaco-laser>

LASER FEMTOSECONDE 4W 1040 nm

Edmund Optics® et Chromacity se sont associés pour développer un nouveau système laser ultrarapide. Ce partenariat implique le laser Chromacity haute puissance 4W à 1040 nm. Ce laser se caractérise par un faisceau ultrarapide <150 fs stable et puissant dans un système compact et facile à installer. Des longueurs d'onde supplémentaires seront ajoutées très prochainement.



<https://www.edmundoptics.fr/f/chromacity-ultrafast-lasers/39924/>

Spectromètre Raman



La gamme QE Pro-Raman d'Ocean Insight comprend des spectromètres préconfigurés pour l'excitation Raman à 532 nm, 638 nm ou 785 nm. Conçus avec des miroirs recouverts d'or et un détecteur FFT-CCD à couche arrière, les spectromètres QE Pro-Raman offrent un faible bruit de fond. Ces spectromètres se révèlent particulièrement bien adaptés à l'analyse Raman des produits chimiques, pharmaceutiques, matières organiques, ...

<https://www.oceaninsight.com/products/spectrometers/raman/qepro-raman-series/>

LASER PICOSECONDE 3 COULEURS



Le laser PRIMA de PicoQuant génère un faisceau laser à 635nm, 510nm, et 450nm, chaque fréquence étant émise individuellement, une à la fois.

Ce nouveau module laser

permet des opérations pulsées à des cadences jusque 200MHz ou continues (CW). En mode pulsé, une puissance moyenne typique de 5mW est disponible pour chaque longueur d'onde, et jusque 50mW en mode CW.

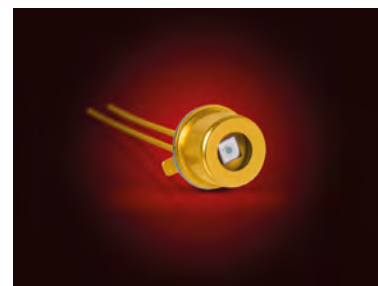
<https://www.picoquant.com/products/category/pico-second-pulsed-sources/prima-stand-alone-3-color-pico-second-laser#documents>

Photodiode à avalanche InGaAs

Ces détecteurs APD InGaAs de Laser Components couvrent une gamme de longueurs d'onde comprise entre 800 nm et 1 700 nm et atteignent leur réponse de crête à

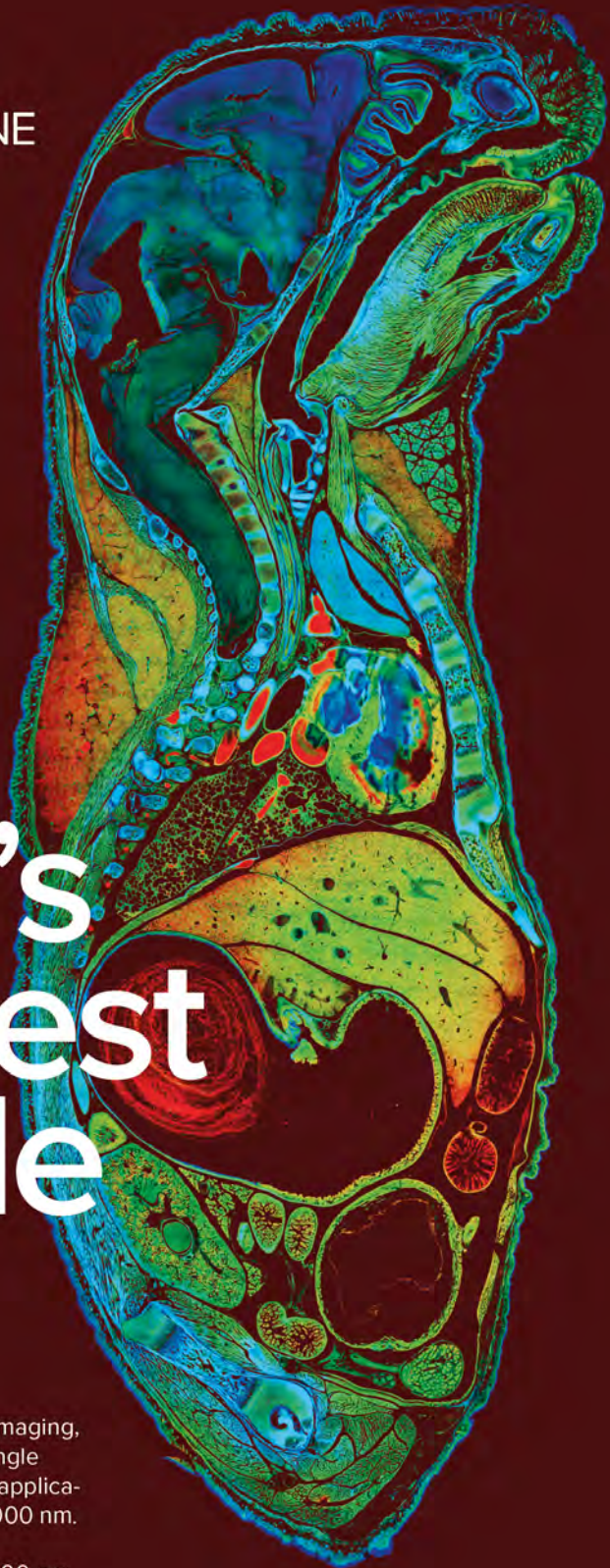
1 550 nm. Dans la gamme de 1 000 nm à 1 600 nm, leur efficacité quantique se situe à 70 %. Ils sont principalement utilisés dans des applications de télémétrie laser.

<https://www.lasercomponents.com/fr/news/des-apd-ingaas-abordables/>





SuperK CHROMATUNE
400-1000 nm



New!

World's broadest tunable laser

Use your SuperK CHROMATUNE for bioimaging, fluorescence imaging & spectroscopy, single molecule imaging and other microscopy applications, at any wavelength between 400-1000 nm.

Excite at any wavelength in the 400 to 1000 nm range. Fiber delivered and diffraction limited. Zero maintenance with a lifetime of thousands of hours and two years warranty.

nktphotonics.com

NKT Photonics

Confocal microscope image of a mouse. Credits: Leica Microsystems