

# 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

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](http://www.photoniques.com)

 Le contenu rédactionnel de Photoniques est élaboré sous la direction scientifique de la Société française d'optique 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](mailto: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](mailto:nicolas.bonod@edpsciences.org)

Journal Manager

**Florence Anglézio**

[florence.anglezio@edpsciences.org](mailto:florence.anglezio@edpsciences.org)

Secrétariat de rédaction et mise en page

**Agence de communication la Chamade**

<https://agencelachamade.com/>

#### Comité de rédaction

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

#### Advertising

Annie Keller

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

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

[annie.keller@edpsciences.org](mailto:annie.keller@edpsciences.org)

#### International Advertising

Bernadette Dufour

Cell phone + 33 7 87 57 07 59

[bernadette.dufour@edpsciences.org](mailto: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](mailto: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.



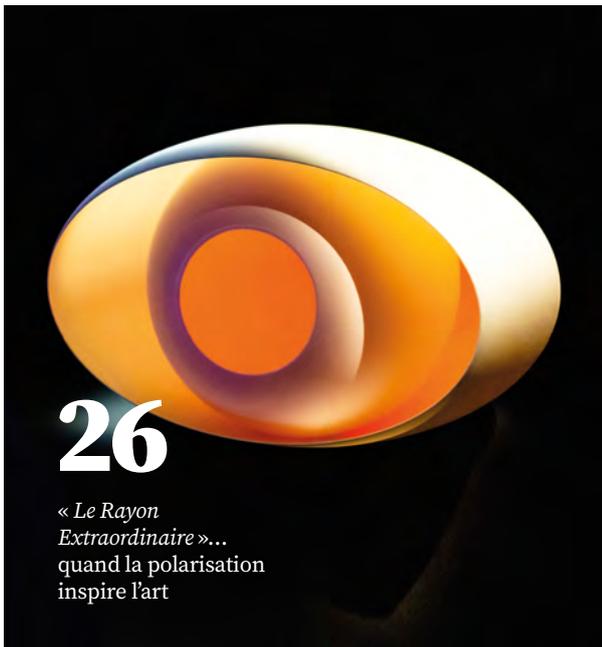
# Sommaire

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 ..... <b>IV<sup>e</sup> de couv.</b>	Toptica ..... 39
ARDOP ..... 17	EPIC ..... <b>II<sup>e</sup> de couv.</b>	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 !

**L**es 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<sup>e</sup> 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 DEEPTech 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).

## 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<sup>er</sup> 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

## 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](http://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

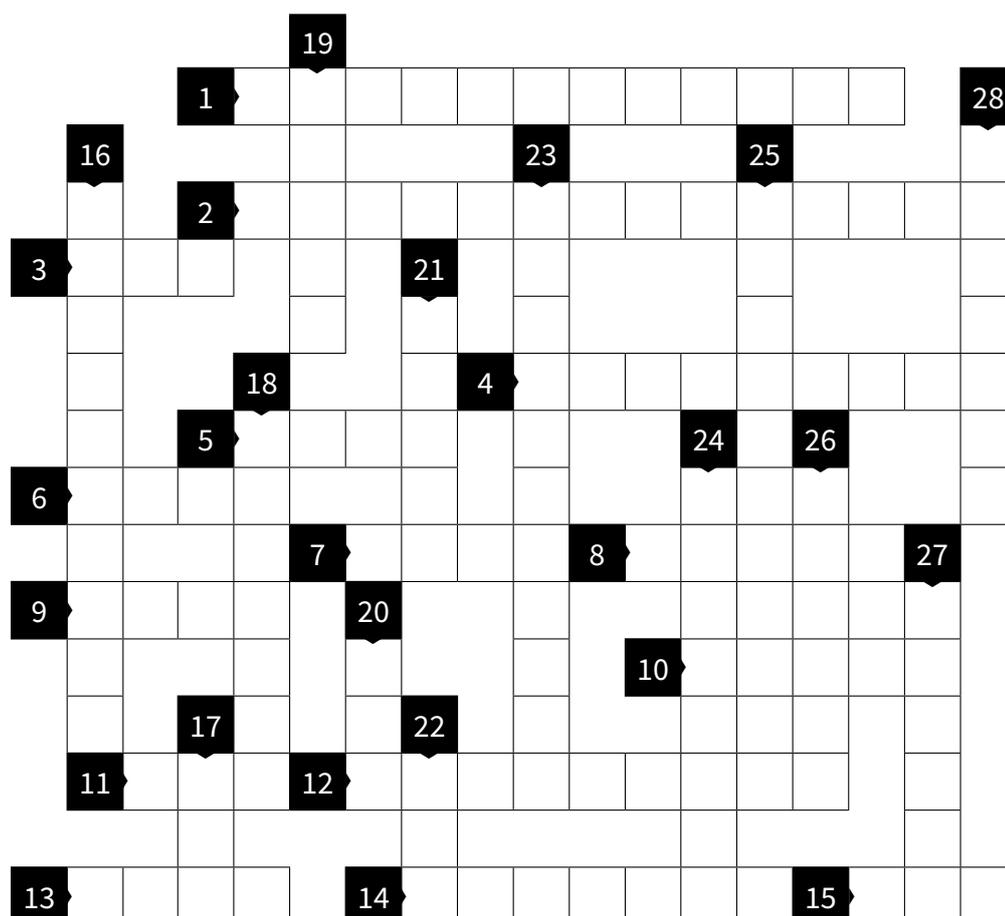


\* Lancée en 2017 par le pôle ALPHA-RLH avec le soutien de la Région Nouvelle-Aquitaine, SAPHyR vise à développer une filière basée sur des solutions photoniques et hyperfréquences pour l'aéronautique.

# 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                                     |    |   |

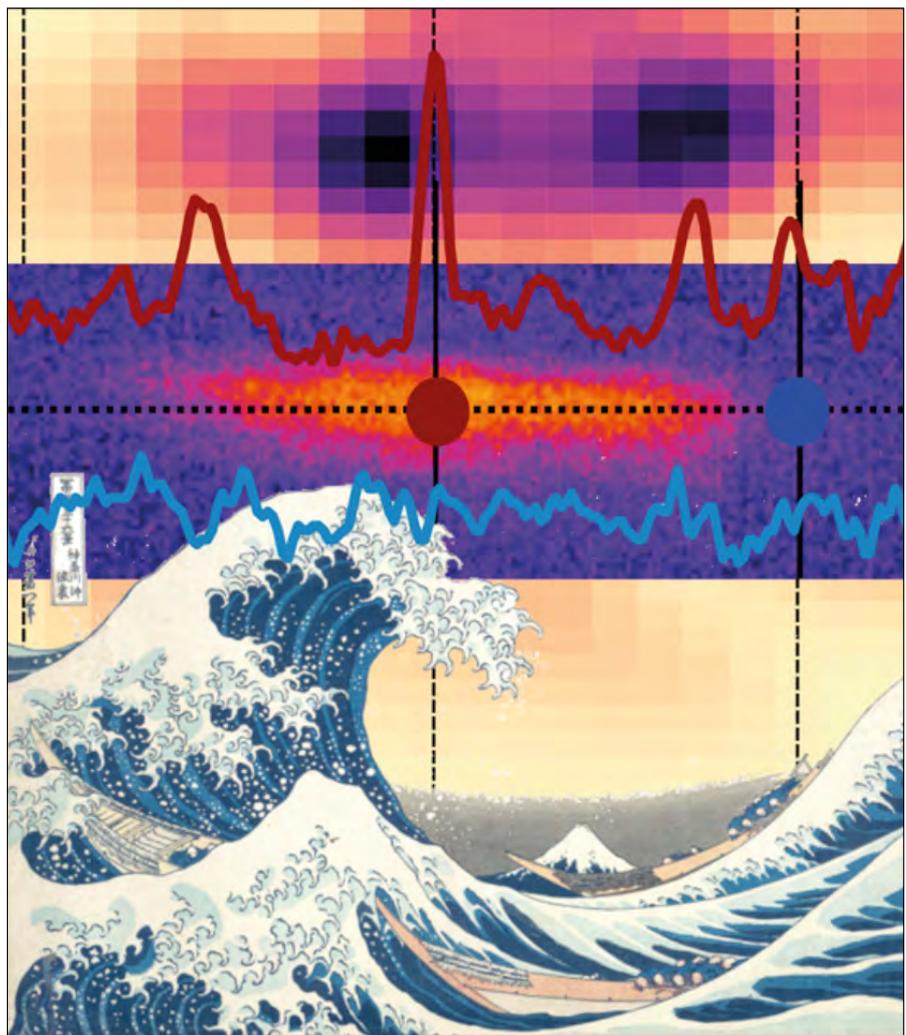
# Prévision d'événements extrêmes à l'aide d'informations partielles dans un microlaser spatio-temporellement chaotique

**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).**

**B**ien 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  $\mu\text{m}$ , 2-2.5  $\mu\text{m}$ , 3.5-4.1  $\mu\text{m}$  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/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](http://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

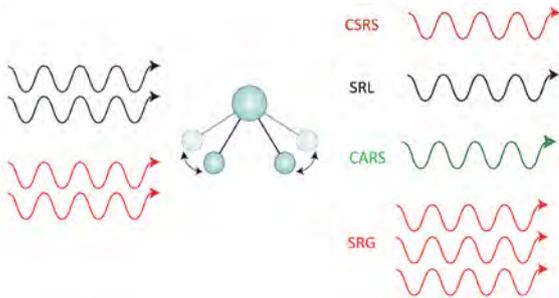
MARKET FOCUS   PRODUCT FOCUS   AWARDS   FTTX FOCUS

Register online at [ecocexhibition.com](http://ecocexhibition.com)

# 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 50µm -3µm [300cm<sup>-1</sup>, 3000cm<sup>-1</sup>], 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<sub>R</sub>. La première onde, dite pompe, de fréquence ω<sub>p</sub> = ω<sub>1</sub> interagit avec la deuxième onde, dite Stokes, dont la fréquence vérifie ω<sub>s</sub> = ω<sub>1</sub> - Ω<sub>R</sub> ; de telle sorte que la différence de fréquences entre les ondes pompe et Stokes soit égale au mode vibratoire moléculaire, ω<sub>p</sub> - ω<sub>s</sub> = Ω<sub>R</sub>. 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 χ<sup>(3)</sup>. 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 ω<sub>CARS</sub> = ω<sub>p</sub> + ω<sub>p</sub> - ω<sub>s</sub> 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  $\Omega_R$  (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

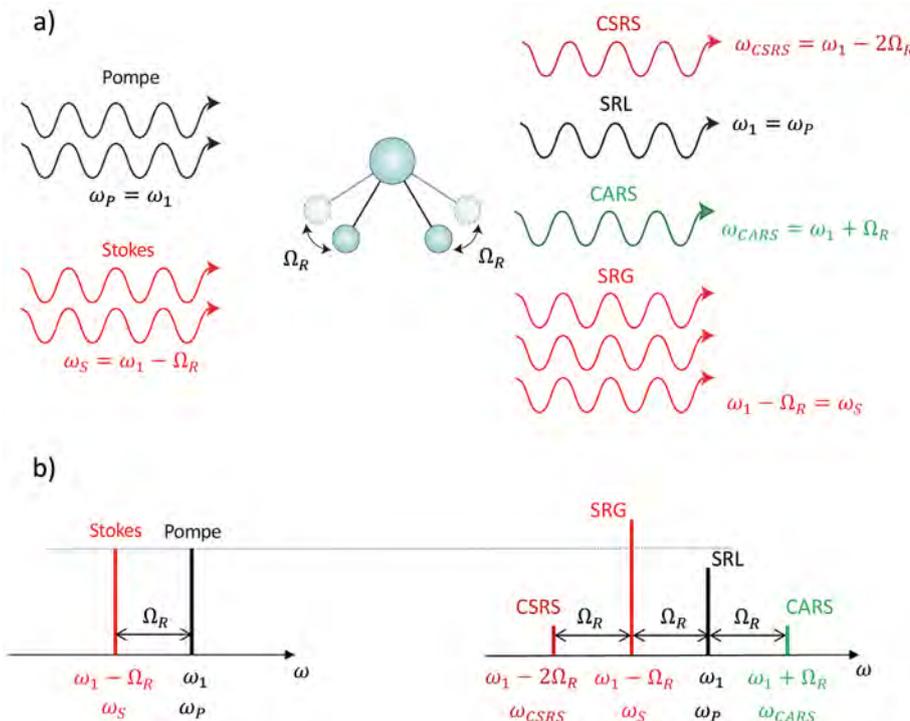
$$\vec{k}_{CARS} = \frac{n_{CARS} \omega_{CARS}}{c} \cdot \vec{e}_{CARS}. \text{ Il est donc}$$

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  $\Omega_R$ , interagissent par 'mélange à quatre ondes' avec une liaison chimique de fréquence vibrationnelle  $\Omega_R$  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  $\Omega_R$ , 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  $\omega_p$  et  $\omega_s$ , qui interagissent avec des molécules de vibration moléculaire  $\Omega_r$ . 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]

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

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  $\omega_p$  et  $\omega_s$ . 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

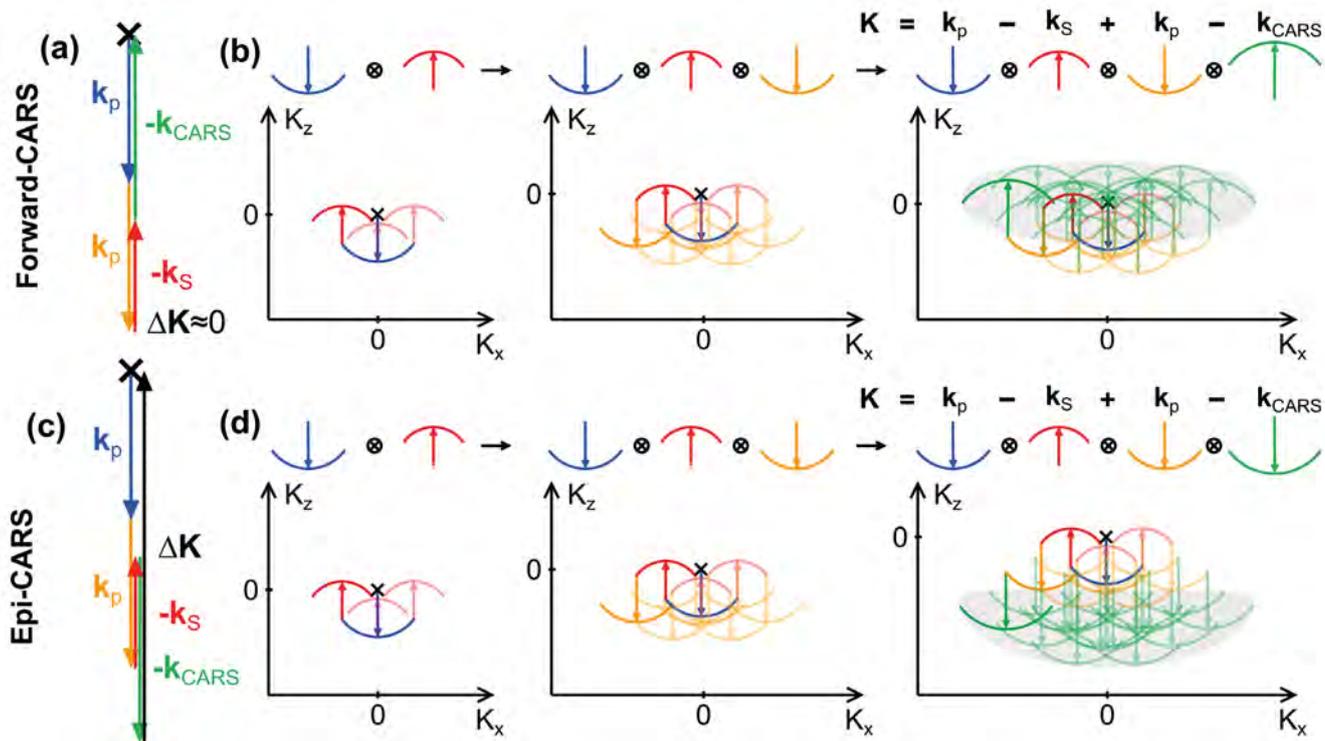
$$P(\omega_{CARS}) = N \epsilon_0 \left(\frac{\partial \alpha}{\partial x}\right)_0 x(\Omega) A_p e^{i(2k_p - k_s)z}, \text{ associé au processus CARS (coherent anti-Stokes Raman scattering)}$$

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

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

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

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 ( $\omega_p$ ) et Stokes ( $\omega_s$ ), 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 seuls 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  $\omega_{AS}$  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/>

