

#### **FOCUS**

Photonique en Métropole Lilloise

## OSEZ L'OPTIQUE

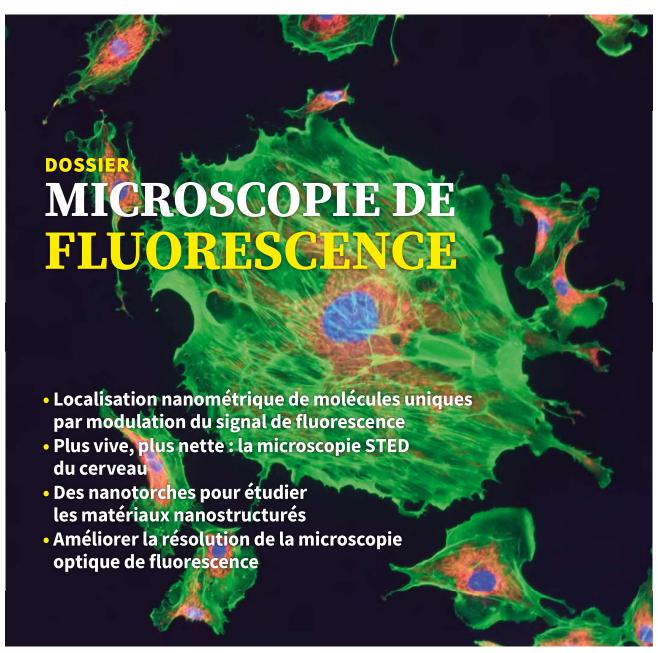
Microscope tomographique (OCT)

#### COMPRENDRE

Génération de Second-Harmonique

#### **ACHETER**

Fibres optiques pour la spectroscopie





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), Benoît Cluzel - (Université de Bourgogne), Émilie Colin (Lumibird), Sara Ducci (Université de Paris), Céline Fiorini-Debuisschert (CEA), Riad Haidar (Onera), Patrice Le Boudec (IDIL Fibres Optiques), Christian Merry (Laser Components), François Piuzzi (Société Française de Physique), Marie-Claire Schanne-Klein (École polytechnique), Christophe Simon-Boisson (Thales LAS France), Ivan Testart (Photonics France).

#### Advertising

Annie Keller

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

#### International Advertising

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

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

## Gestion des abonnements abonnements@edpsciences.org

#### Impression

Fabrègue imprimeur B.P. 10 87500 Saint-Yrieix la Perche Dépôt légal : Juin 2022 Routage : STAMP (95)



# Éditorial



NICOLAS BONOD Rédacteur en chef

## **Bonnes résolutions**

oup de tonnerre sur la microscopie lorsque le physicien allemand Ernst Abbe montre à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle que la résolution d'un microscope est limitée par la nature ondulatoire de la lumière. Abbe établit que l'image d'un point par un microscope s'étale sur un rayon proportionnel au rapport entre la longueur d'onde et l'ouverture numérique de l'objectif. La microscopie optique aurait alors pu se borner à cette limite... mais c'était sans compter sur la ténacité des microscopistes décidément résolus à surmonter les limites de la résolution! L'une des clés pour y parvenir provint des progrès réalisés dans la synthèse de molécules fluorescentes. Ces minuscules éléments de matière condensée ouvrent de nouveaux standards en termes de résolution grâce à une ingénierie de la réponse non-linéaire ou stochastique de leur émission de fluorescence. La microscopie super-résolue de fluorescence s'est rapidement développée pour explorer la matière à de nouvelles échelles et offrir un outil unique pour comprendre la structuration du vivant. Le prix Nobel de chimie décerné en 2014 à Eric Betzig, Stefan Hell et William Moerner couronna le développement de deux techniques de microscopie de fluorescence, STED et SMLM. La remise de ce prix dans la catégorie de la chimie illustre d'ailleurs l'impact considérable que ces techniques ont eu au-delà de l'optique. Tour d'horizon dans ce numéro sur la microscopie

super-résolue de fluorescence avec quatre articles consacrés à cette thématique qui ne cesse de progresser et d'ouvrir de nouveaux horizons.

Il y a tout juste 100 ans, Léon Brillouin publiait un article dédié à l'influence de l'agitation thermique dans un corps sur la diffusion de la lumière et des rayons X. Dans son article, il prédit un décalage de fréquence entre l'onde diffusée et l'onde incidente dépendant de la vitesse de propagation des ondes élastiques. Cet effet est aujourd'hui connu sous le nom d'effet Brillouin. Certes, Léon Brillouin prévient dans son article que « cette diffusion est à peine perceptible », mais l'avènement depuis cette publication du laser, de la fibre optique et de la photonique dans son ensemble a permis là aussi de repousser les limites permettant aujourd'hui de développer de nombreux procédés technologiques basés sur la diffusion Brillouin. Les auteurs de l'article Expérience Marquante retracent dans un article passionnant ce siècle de découvertes et d'avancées.

La date de parution de ce numéro coïncide avec la tenue du congrès Optique Nice 2022 de la SFO. Photoniques sera bien évidemment présent à ce rendez-vous majeur de l'optique en France. Je vous donne donc rendez-vous à Nice dès le 4 juin sur le stand Photoniques et dans les allées du congrès pour échanger avec vous sur la revue et les dernières avancées en optique et photonique.

Je vous souhaite une bonne lecture.



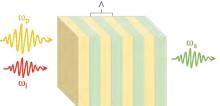
**17** 

OSEZ L'OPTIQUE Microscope tomographique (OCT)

# 30 Localisation nanométrique de molécules uniques par modulation du signal de fluorescence

**51**Génération
de Second-Harmon

de Second-Harmonique: un domaine ancien et riche d'avenir



# Sommaire

www.photoniques.com

N° 114

#### ACTUALITÉS

**03** Éditorial et actualité de la SFO

**05** Informations partenaires

#### TÉMOIGNAGE

**14** Témoignage d'entrepreneur : Thierry Georges

**16** Mots-croisés

#### FOCUS

17 La photonique dans la métropole Lilloise

#### OSEZ L'OPTIQUE

21 Construire un système d'imagerie 3D de tomographie par cohérence optique (OCT)

#### **EXPÉRIENCE MARQUANTE**

**26** Centenaire de la découverte de l'effet Brillouin

#### DOSSIER: MICROSCOPIE DE FLUORESCENCE

30 Localisation nanométrique de molécules uniques par modulation du signal de fluorescence

**36** Plus vive, plus nette : la microscopie STED du cerveau

**40** Des nanotorches pour étudier les matériaux nanostructurés

**45** Améliorer la résolution de la microscopie optique de fluorescence

#### COMPRENDRE

**51** Génération de Second-Harmonique : un domaine ancien et riche d'avenir

#### **ACHETER**

**57** Des fibres optiques pour la spectroscopie

#### **PRODUITS**

**61** Nouveautés

# Annonceurs

Alpao	2
Ardop	4
Comsol	1
Educated Outline 22	٠,

Hamamatsu 43	В
HTDS19	5
IDIL 5	7
Imagine Optic 3:	1
iXblue IIe de couv	

Laser Component	55
Lumibird	39
MKS Newport IVe de co	uv.
Opton	35
Oxford	53

Scientec	59
Spectrogon	49
optica 33,	47

# L'édito de la SFO



## Nos jeunes, notre SFO

PTIQUE Nice 2022 s'annonce sous les meilleurs auspices, les indicateurs sont ensoleillés! Plutôt que de tous les énumérer, je souhaite mettre en lumière un qui nous réjouit tout particulièrement. Un tiers des très nombreuses communications retenues ont été soumises par des jeunes chercheurs en thèse. Pour un grand nombre d'entre eux, il s'agit de la première présentation, orale ou poster, dans une conférence d'envergure et d'une première expérience de réseautage. OPTIQUE Nice 2022 est sur ce point d'ores et déjà un succès et je tiens à saluer nos jeunes congressistes. Je salue également nos collègues directeurs de thèse qui, malgré les multiples contraintes associées à la durée des thèses, ont bien compris l'intérêt que représente pour les carrières de nos jeunes « l'entrée » dans la grande communauté académique et industrielle de l'optique française. Une telle confiance et un tel engouement nous engagent. Si cette jeunesse assure la relève et si l'essor de la photonique leur ouvre plus que jamais des métiers aussi divers que passionnants, il n'en reste pas moins que nous devons l'accompagner de la meilleure manière possible et pour cela nous souhaitons tout d'abord l'écouter.

OPTIQUE Nice 2022 constituera un premier jalon dans notre renouvellement des services envers et par nos jeunes collègues. Nous y mettrons à disposition des étudiants en thèse, des post-doctorants et des jeunes récemment recrutés dans les milieux académique ou industriel, un espace convivial où ils pourront échanger à leur guise. Seule contrainte, répondre sans retenue à la question : qu'attendez vous de votre SFO?

OPTIQUE Nice 2022 permettra également aux jeunes de rencontrer de très nombreux industriels et jeunes entrepreneurs, dans une grande exposition industrielle avec 44 stands, lors des présentations dans la session industrielle ou dans des sessions thématiques. Ce sera pour eux également l'occasion de

s'informer, notamment lors de la plénière présentée par notre ex président Philippe Aubourg, membre de la Commission Otique/Physique sans frontière, sur les atouts économiques et sociétaux de l'optique frugale et des cycles courts.

OPTIQUE Nice 2022 nous donnera également l'occasion de dévoiler la maquette de la plateforme créée en partenariat avec le Réseau des Ecoles Doctorales SPI, qui permettra d'accéder à de nombreuses informations particulièrement éclairantes pour nos jeunes. Cette plateforme illustrera notamment la richesse des parcours après une thèse dans les disciplines de l'optique. Elle complètera l'excellente plateforme sur les métiers de la photonique développée par notre partenaire Photonics France.

Je conclurai cet édito par une touche plus personnelle. L'article Comprendre de ce numéro, met à l'honneur la génération de seconde harmonique dont la première mise en évidence est fascinante de simplicité. Elle a marqué un tournant dans l'histoire de l'optique en matérialisant un domaine d'activités qui m'est cher, l'optique non-linéaire. Alors qu'OPTIQUE Nice 2022 accueille de nouveau la cérémonie du prix Jean Jerphagnon, je souhaite rappeler qu'en 1967, cinq années seulement après l'expérience de Franken, Jean Jerphagnon soutenait au Centre National d'Etudes des Télécommunications à Bagneux, une institution disparue qui m'est également chère, une des premières thèses ès sciences en optique non-linéaire. Ses travaux, pionniers, d'exploration du rapport entre mailles élémentaires chirales, biréfringence et non-linéarité, ont marqué un jalon important dans cette histoire désormais foisonnante de l'optique non-linéaire.

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



## **OPTIQUE Nice 2022**



### Le programme est disponible sur le site de la SFO www.sfoptique.org

Nous pouvons être satisfaits de la participation importante de notre communauté ainsi qu'en atteste un nombre de contributions record (près de 500!). Votre engagement a porté ses fruits et nous vous en remercions vivement.

#### La session industrielle

## Valeo, Fastlite, Silios Technologie, Exfo et Solnil

La session industrielle d'OPTIQUE Nice 2022 se tiendra le mercredi 6 juillet en début d'après-midi. Elle sera introduite par une mini-plénière de Philippe Aubourg qui abordera le thème de l'optique frugale et à circuits courts, une tendance industrielle émergeante qui allie efficacité et soucis écologiques. La session regroupera également des exposés d'entreprises de tailles variées : start-up, petite entreprise bien implantée, grand groupe. Les présentations, à caractère très majoritairement technique, permettront d'introduire des innovations récentes dans les domaines de l'automobile, des sources femtosecondes puissantes, du tri de déchets, de l'agro-alimentaire, du test avancé à même de valider des composants de photonique intégrée lors du délicat passage entre démonstrateurs de laboratoire et chaine de production ou encore de la production sur grande surface de polymères structurés à l'échelle nanométrique.

Venez nombreux à cette session qui complète un salon avec plus de 40 exposants industriels.

# Félicitations à notre collègue Pascale Nouchi



ascale Nouchi, notre présidente 2017-2019 et actuelle administratrice Thales du GIE III-V Lab a été nommée au grade de Chevalier de la Légion d'Honneur. Félicitations Pascale!

Une nomination amplement méritée qui souligne à la fois ses apports scientifiques et techniques notamment pour le développement de fibres optiques qui ont révolutionné les communications optiques, son rôle dans le management de structures de R&D et son implication dans l'animation de la communauté de l'optique, comme à travers la présidence de

notre SFO. Dans un discours émouvant et plein de retenue Pascale a rappelé l'importance de la parité et le rôle important joué par notre SFO dans cette quête.

# **ATELIER PARITÉ**JOELLE BRAUENER À OPTIQUE NICE 2022

#### le jeudi 07 juillet à partir de 11h00

Pour donner suite aux questions soulevées lors de la session dédiée à la parité à OPTIQUE-Dijon, nous vous proposons, lors de votre venue à OPTIQUE-Nice, de rejoindre un atelier qui a pour but de définir ensemble des actions concrètes que nous pouvons mettre en œuvre. Cet atelier sera animé par Joëlle BRAUENER, qui est sociologue du genre et des inégalités, et travaille actuellement avec plusieurs équipes universitaires dans l'implémentation des questions relatives au genre et à l'égalité dans leurs pratiques, principalement à l'université de Strasbourg. Depuis plusieurs années, elle est aussi formatrice pour des institutions publiques, au sein desquelles on compte la mission pour la place des femmes du CNRS. Dans le cadre d'une démarche constructive, bienveillante et inclusive, nous essayerons de trouver ensemble des solutions qui ont des chances de récolter une forte adhésion si elles partent de la base. Pour être efficace, un tel atelier ne peut inclure plus de 25 personnes. Si vous envisagez de participer à cet atelier, contactez-nous s'il vous plait.

#### Objectifs de l'atelier

- Identifier et sérier comment les inégalités structurelles entre les femmes et les hommes se matérialisent dans le domaine de la recherche scientifique
- Comprendre comment les mécanismes de production des inégalités se perpétuent, ou, au contraire, sont mis en échec
- Interroger le dispositif de la parité dans son intention et son effectivité ; explorer des pistes d'actions transformatrices

La démarche alternera les apports théoriques avec les savoirs d'expérience des participant.es.

#### CONVOCATION À L'ASSEMBLÉE GÉNÉRALE EXTRAORDINAIRE DE LA SFO

Lundi 04 juillet 2022 à OPTIQUE Nice 2022 de 18h00 à 19h00 - Votez dès maintenant en ligne

Notre Conseil d'Administration qui s'est tenu le mardi 31 mai 2022 vient d'approuver à l'unanimité la première étape vers des statuts conformes aux exigences d'une Association Reconnue d'Utilité Publique (ARUP). Ces statuts conformes ARUP constitueraient une reconnaissance par l'état de nos missions au service de la communauté de l'optique et la photonique. Nous comptons sur l'expression de votre adhésion par le vote et espérons vous rencontrer à OPTIQUE Nice.

# La réalité virtuelle : le futur de l'éducation



a Graduate School NANO-PHOT, située à l'Université de Technologie de Troyes, propose une formation d'excellence en 5 ans (Master + Doctorat) sur l'utilisation de la lumière à l'échelle du nanomètre. Son programme pédagogique s'appuie sur des outils de formation innovants comme l'Immersive Photonics Lab de la société ALPhaNOV.

Cette application de réalité virtuelle reproduit fidèlement les phéno-

mènes physiques et permet de développer efficacement les compétences procédurales que ce soit dans les milieux industriels ou de l'enseignement. Cet outil émule tous les équipements nécessaires pour former les étudiants, partout, tout le temps et sans risque de blessures. Innovant à la fois d'un point de vue pédagogique et technologique, l'Immersive Photonics Lab facilite l'accès aux équipements de photoniques de dernière génération. Typiquement, les travaux pratiques vont de l'alignement laser à l'interféromètre de Michelson, en passant par la conception d'un agrandisseur de faisceau, entre autres.







# **FORMATION** À DISTANCE

Les confinements successifs ont permis d'accélérer la révolution numérique au service des enseignements. Les établissements d'enseignement supérieur se sont dotés de tableaux numériques et de cabines de création de contenus vidéos tandis que les professeurs se



formaient aux nouvelles méthodes pédagogiques, telles que les classes inversées, les sondages participatifs ou les tests en ligne... L'Université de Technologie de Troyes a été moteur de cette révolution numérique en investissant de grosses sommes sur ces nouvelles technologies.

En parallèle, la Région Grand Est a initié dès 2017 un partenariat avec l'ensemble des 50 Grandes Écoles du territoire régional (écoles d'ingénieurs, de management, de design, d'arts appliqués et d'architectes) en mettant en place un Pacte Grandes Écoles. L'Université de technologie de Troyes (UTT) et CentraleSupélec ont alors signé un accord-cadre pour initier et développer sur le long terme un rassemblement d'acteurs académiques et industriels de la photonique en Région Grand Est. L'originalité du projet "Photonique 4.0" repose d'abord sur son sens du maillage territorial Grand Est, misant sur la vision et l'expertise de deux grandes écoles d'ingénieur UTT et CentraleSupélec, ainsi qu'au développement de la « Smart Communication » au service d'un enseignement innovant. À la fois sur les sites de CentraleSupélec (campus de Metz) et de l'UTT (Troyes), deux salles immersives flambant neuves (Webex de la société Cisco) ont été équipées pour permettre de suivre des enseignements à distance. La graduate school NANO-PHOT a élargi ce partenariat en équipant une nouvelle salle à l'Université de Reims Champagne Ardennes (URCA) permettant aux étudiants des deux sites de participer aux mêmes cours de façon interactive et immersive.

# Actualités

Le premier Research Day de la Graduate School a eu lieu à Reims le 5 mai dernier. Il a permis aux enseignantchercheurs des laboratoires partenaires troyens et rémois de se rencontrer afin d'échanger sur leurs derniers travaux et d'initier des collaborations dans lesquels les étudiants de la Graduate School seront acteurs.

- La nouvelle promotion de la GS est en cours de recrutement. Plus d'infos sur https://nano-phot.utt.fr/ apply-to-nanophot
- Suivez l'interview d'une étudiante de la Graduate School sur Youtube: https://www.youtube.com/ watch?v=23e8A1UUWWA



#### AGENDA

■ La gradutate school sera présente à Optique Nice. N'hésitez pas à venir vous renseigner sur le stand NANO-PHOT. Du 4 au 8 juillet 2022, Nice

■NANO-PHOT sera représentée à NFO16 (16° conférence internationale sur la « Near-Field Optics ») Victoria au Canada du 29 août au 2 septembre 2022 https://nfo16.ecc.uvic.ca



N'hésitez pas à contacter Mme Angélique BAVASSO, secrétaire de la graduate

school, pour obtenir de plus amples informations

Tel: +333 25 71 97 30 Email : nanophot@utt.fr

# TÉMOIGNAGE D'ENTREPRENEUR

# **Thierry Georges, Oxxius**



Photoniques s'entretient avec Thierry Georges, PDG d'Oxxius, entreprise basée à Lannion spécialisée dans la conception de lasers. Thierry Georges est également membre de la SFO, membre du CA de Photonics France, membre de Photonics Bretagne, et VP du jury du prix Jean Jerphagnon, prix dont il a été auparavant président du jury.

#### À L'ISSUE DE VOS ÉTUDES, VOUS VOUS ÊTES TOUT D'ABORD DIRIGÉ VERS LE SECTEUR DES TELECOMS.

Polytechnicien (X84), Télécom 89 (corps), j'ai profité de la fin de mes études pour faire 9 mois de R&D sur les lasers en Californie (Continuum) et j'ai notamment eu l'occasion de me familiariser avec les premiers DPSS (diode-pumped solid-state lasers) issus de l'Université de Stanford. Mais j'ai souhaité commencer ma carrière avec une activité de recherche. J'ai rejoint le Centre National d'Etudes en Télécommunications à Lannion où j'ai étudié l'amplification optique et la transmission à très haut débit (solitons), mais aussi les premiers lasers à fibre. J'ai passé ma thèse en 1994 sur ces sujets et j'ai annoncé en 1996 que mon équipe serait la première à atteindre une transmission de 1 Tbit/s sur 1000km. Pari gagné en 1999 (présentation des résultats à la conférence Optical Fiber Communications à San Francisco).

À cette époque, le monde des télécommunications était en grande rupture et j'ai donc décidé de créer Algety Telecom pour développer et commercialiser des systèmes de transmission de données à très haut débit. Nous avons développé un produit en 18 mois (et recruté 240 personnes) et gagné 2 clients américains. Nous avons été rachetés par Corvis qui avait besoin de nous pour bien réussir son introduction en bourse (NASDAQ). Les briques technologiques étaient prêtes pour les nouveaux réseaux de télécommunications. En revanche, elles étaient trop chères. La réduction des coûts s'est faite après l'éclatement de la bulle télécom (2001) par une fabrication massive des composants en Asie.

# VOUS VOUS INVESTISSEZ ALORS FORTEMENT DANS LA STRUCTURATION ET LA PROMOTION DE LA PHOTONIQUE EN BRETAGNE.

En 2002, Corvis active ma clause de non concurrence et me paie un an à rien faire. J'en profite pour sauvegarder des savoir-faire technologiques (fibres) en participant à la création de la plateforme PERFOS. Mais j'aide également plusieurs personnes à monter leurs entreprises (essentiellement photoniques) à Lannion. En 2006, je milite en vain pour que la photonique soit représentée par l'un des nouveaux pôles de compétitivité bretons. Suite à cet échec, nous créons le cluster Photonics Bretagne, afin de représenter et de développer la filière photonique bretonne.

#### QUELLES ÉTAIENT VOS MOTIVATIONS POUR FONDER UNE SOCIÉTÉ SPÉCIALISÉE DANS LES LASERS ? COMMENT AVEZ-VOUS IDENTIFIÉ LES BESOINS DU MARCHÉ EN LASERS?

Initialement, Oxxius a fait partie des sociétés que j'ai aidées à se lancer à Lannion. Costel Subran était co-fondateur et connaissait très bien le marché. Mais le sujet m'a particulièrement intéressé car le développement de DPSS compacts pour le remplacement des lasers à gaz m'a rappelé mes premiers pas dans le domaine des lasers. J'ai aussi pensé que nous pouvions utiliser certaines leçons (compacité, collage, structures monolithiques) du développement des télécommunications optiques pour développer ce marché. Et franchement, des lasers couvrant tout le spectre visible, c'était bien plus sympa que les lasers infrarouges des télécommunications. Au labo, c'était Noël toute l'année.

#### COMMENT AVEZ-VOUS DÉVELOPPÉ LA TECHNOLOGIE ET LES PREMIERS COMPOSANTS ?

L'autre raison qui m'a plu dans le projet était le besoin de développer de nombreuses technologies novatrices : l'assemblage monolithique de cavités laser, le développement d'un polariseur adapté à ces structures monolithiques, le design permettant un fonctionnement monofréquence sans réglage par tilt de composants, la grande variété de milieux amplificateurs, notamment avec l'arrivée de nouvelles pompes visibles (technologie du blu-ray),...

#### AVEZ-VOUS RENCONTRÉ DES DIFFICULTÉS EN TERMES DE PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES ET DE CROISSANCE ?

Oui, la plus grosse difficulté provenait de l'assemblage monolithique de cristaux. Surtout que certains cristaux (non linéaires) peuvent avoir des expansions thermiques jusqu'à 5 à 10 fois plus grandes que les matériaux classiques. Cette difficulté m'a en partie fait perdre mes deux cofondateurs.

L'industrie du semiconducteur assemble des wafers de silicium et de silice, mais clairement les procédés n'étaient pas adaptés à nos cavités. Devant l'ampleur de la tâche, nous aurions pu abandonner cette idée, mais les bénéfices (cavité scellée par design, pertes fortement réduites, fiabilité accrue) étaient trop importants. Aujourd'hui, nos efforts sont récompensés par des produits aux qualités uniques sur le marché.

#### QUELLES ÉTAIENT VOS MOTIVATIONS POUR AUGMENTER LA PUISSANCE DE VOS LASERS ?

L'efficacité naturelle de nos cavités ont permis rapidement d'atteindre de fortes puissances visibles (300mW ou plus). Cela nous ouvrait le marché haut de gamme des sciences de la vie. Mais nous avons été confrontés à la dégradation des cristaux non linéaires. Cela nous a poussés à développer le collage des cristaux de LBO (collage probablement le plus difficile).

#### VOUS FAITES LE CHOIX D'AVOIR UNE FORTE VISIBILITÉ INTERNATIONALE SUR QUELQUES APPLICATIONS PHARES.

Nos lasers à 532nm sont probablement les plus purs spectralement du marché. Cela nous a ouvert le marché de la spectroscopie Raman. Mais notre gamme complète de couleurs disponibles nous a poussés à investiguer le marché des sciences de la vie (microscopie, cytométrie en flux par exemple). Pour ce faire, il fallait développer des sous-systèmes complets (comme des combineurs de longueur d'onde). Il s'est avéré que les avantages de nos lasers se traduisaient par plus de performance pour les sous-systèmes. Par exemple, la moindre consommation électrique apporte plus de stabilité thermique. Les fortes puissances de nos lasers rouges et leur petit format sont particulièrement appréciés en microscopie de super-résolution. Nous avons fait développer des fibres à Photonics Bretagne qui complètent notre palette d'avantages.

Ainsi, petit à petit, nos produits sont devenus des références du marché de la microscopie. Cela conforte notre position à l'international (70% d'exportation depuis plus de 10 ans).

#### LES ACTIVITÉS D'OXXIUS SONT-ELLES REGROUPÉES À LANNION?

Oui. L'expérience des télécommunications nous a poussés à développer des produits fabricables en France, sans surcoût majeur (cavités monolithiques par exemple). Cela évite par ailleurs de nous faire piller notre technologie. Aujourd'hui nous sommes 58 personnes à Lannion. Mais nous envisageons d'ouvrir des filiales commerciales à l'étranger.

#### VOUS ÊTES TRÈS IMPLIQUÉ DANS LA PROMOTION DE LA PHOTONIQUE ET LE RAPPROCHEMENT ENTRE SAVOIR-FAIRE ACADÉMIQUE ET LES ACTIVITÉS INDUSTRIELLES.

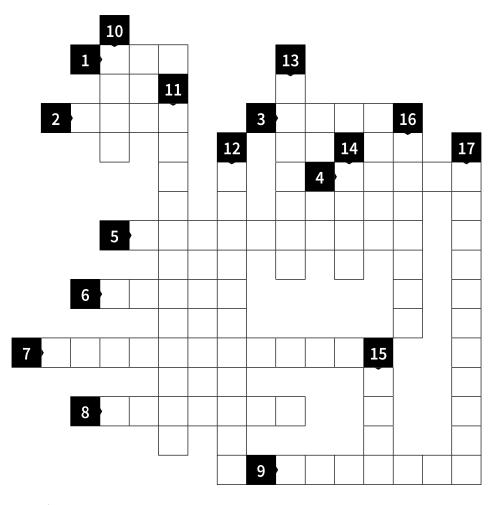
Nous avons d'excellents laboratoires photoniques en France. Mais la marche est souvent un peu grande entre la recherche académique et la création d'entreprise. Il y a 30 ans, le CNET faisait le lien entre la recherche académique et les applications industrielles (malheureusement la création d'entreprise n'était pas encouragée).

Aujourd'hui, le succès d'entreprises technologiques comme la nôtre montre la voie. Mais toute initiative supplémentaire qui pousse et aide les scientifiques à mettre sur le marché leurs idées permet d'étoffer le tissu industriel français. Ainsi, lorsqu'on m'a demandé de participer au jury du prix Jerphagnon j'ai accepté avec plaisir. Lorsque j'ai présidé le jury, j'ai poussé à primer les créations d'entreprises. Mon implication dans Photonics France suit la même logique. Je crois que l'académique et l'industrie peuvent se renforcer mutuellement.



# MOTS CROISÉS SUR LA MICROSCOPIE DE SUPER RÉSOLUTION

#### Par Philippe ADAM



- 1 Microscopie de fluorescence super-critique
- 2 Fluorescence par réflexion totale interne
- 3 Nobel de Chimie 2014
- 4 Reconstruction d'image orageuse
- 5 Dimension d'analyse des échantillons
- 6 En microscopie super-résolue, outil de balayage
- 7 Onde à confiner
- 8 Très fine épaisseur d'analyse
- 9 Réflexion totale
- 10 Technique d'imagerie non linéaire
- 11 Outil d'imagerie du vivant
- 12 Il faut savoir dépasser ses limites!
- 13 Pénètrent plus profond quand ils sont deux
- 14 Réduction de la tache de diffraction par dépletion par émission stimulée
- 15 Aujourd'hui, on voit au-delà de son épitaphe graçe à nos bonnes résolutions
- 16 Prix Nobel de Chimie en 2014
- 17 Nom générique des techniques mentionnées dans ce numéro de Photoniques

SOLUTION SUR PHOTONIQUES.COM



# La photonique dans la métropole lilloise

Ces dernières années, la métropole lilloise s'est imposée comme un pôle de recherche académique incontournable dans le domaine de la photonique. C'est notamment le cas des travaux en optique fibrée, en optique non-linéaire, en topologie ou encore en photonique-Terahertz, qui ont une forte visibilité internationale. En lien étroit avec les grandes universités, le Conseil Régional et des industries implantées en région, ces activités structurent recherche et formation dans la métropole lilloise.

#### https://doi.org/10.1051/photon/202211417

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.

#### Laurent BIGOT1,\*, Guillaume DUCOURNAU2, Alberto AMO1

- <sup>1</sup>Univ. Lille, CNRS, UMR 8523 PhLAM Physique des Lasers Atomes et Molécules, F-59000 Lille, France
- <sup>2</sup> Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, Junia, Univ. Polytechnique Hauts-de-France, UMR 8520 - IEMN - Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologie, F-59000 Lille, France
- \*laurent.bigot@univ-lille.fr

a recherche en optique et photonique dans la Région Hauts-de-France s'appuie sur les compétences de plusieurs laboratoires académiques basés dans différents établissements universitaires répartis sur le territoire, à savoir sept universités (Université d'Artois, Université de

Lille, Université du Littoral Côte d'Opale, Université de Picardie Jules Verne, Université Polytechnique Hautsde-France, Université de Technologie de Compiègne et Université Catholique de Lille) et quinze écoles (parmi lesquelles Centrale-Lille, PolyTech Lille et IMT Nord Europe). Créé le 1er janvier 2022, le nouvel établissement « Université de Lille » réunit facultés, instituts et écoles de renom et, avec plus 75 000 étudiants (dont 10 000 internationaux de 150 nationalités différentes) constitue à un carrefour de l'Europe l'une des plus grandes universités francophones. Parmi les 70 unités de recherche environ qu'elle héberge, deux laboratoires en particulier, basés sur le site de la Faculté des Sciences et Technologies de Villeneuve d'Ascq, développent des activités de recherche en photonique : il s'agit du PhLAM (laboratoire de Physique des Lasers, Atomes et Molécules) et de l'IEMN (Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie), rattachés respectivement aux instituts CNRS INP (Institut de physique) et INSIS (Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes). Nous proposons de mettre l'accent sur quelques axes de recherches de ces unités, particulièrement marquants et à forte visibilité internationale.

## Acteurs et structuration de la recherche en Photonique dans la métropole lilloise

#### Fibres optiques de spécialité

Le PhLAM, spécialiste de l'interaction lumière-matière, est constitué en 5 équipes de recherche dont les équipes Photonique, DYSCO (Dynamique des Systèmes Complexes) et Atomes Froids. L'expertise de ces équipes couvre les domaines thématiques de l'optique guidée linéaire et non-linéaire, de la conception à la mise en œuvre de fibres optiques de spécialité, de l'exploration des dynamiques complexes en Optique/Hydrodynamique/Biologie/Physique des Plasmas, de l'étude de nouvelles phases topologiques de la

# Construire un système d'imagerie 3D de tomographie par cohérence optique (OCT)

#### Gaël LATOUR<sup>1,2</sup>

- <sup>1</sup>Université Paris-Saclay, Faculté des Sciences, 91190 Gif-sur-Yvette, France
- <sup>2</sup>Laboratoire d'Optique et Biosciences, Ecole Polytechnique-IPParis, CNRS, Inserm, 91128 Palaiseau, France

\*gael.latour@universite-paris-saclay.fr



Les étudiants ont la fierté de construire - de toute pièce - un microscope produisant des images tridimensionnelles (3D) d'objets transparents ou faiblement diffusants. Le projet laisse le temps aux étudiants de progresser en toute autonomie et de surmonter les difficultés théoriques et expérimentales rencontrées. Leur rigueur et leur ténacité sont récompensées par la beauté des films 3D qu'ils réalisent avec leur propre microscope.

#### https://doi.org/10.1051/photon/202211421

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.

es séances expérimentales comportent généralement des objectifs clairs pour l'équipe pédagogique, toutefois, les étudiantes et les étudiants ne les perçoivent pas toujours. Deux raisons peuvent être identifiées: des énoncés parfois très détaillés, avec de nombreuses questions et des protocoles complets, et la durée contrainte des séances expérimentales (généralement de quelques heures à une journée). Peu de place est alors laissée à la réflexion et au recul nécessaires à la pratique expérimentale, intrinsèquement constituée d'essais et erreurs successifs. Cet aspect peut être amplifié dans le cas où les étudiants doivent rendre un compte-rendu à l'issue de la séance. Par ailleurs, le matériel pédagogique

utilisé en enseignement présente diverses limitations (éléments de qualité moyenne ou obsolètes, quelques fois peu compatibles entre eux, hétéroclites). C'est alors parfois source de frustration chez les étudiants qui ne peuvent pas toujours pousser les capacités de leurs réalisations expérimentales dans leurs retranchements: les étudiants constatent que les limitations des résultats obtenus sont liées au matériel disponible et non à leur habileté expérimentale. Ces séances expérimentales peuvent alors échouer à transmettre le goût de la physique expérimentale. À travers la mise en place de ce projet expérimental d'optique consacré à la construction et à l'utilisation d'un système d'imagerie de tomographie par cohérence optique (OCT), les objectifs pédagogiques sont les suivants :

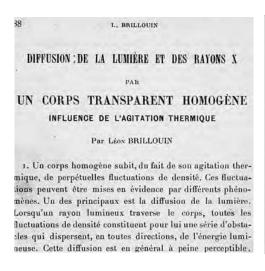
- Transmettre la passion de la physique expérimentale, et plus particulièrement de l'optique, et faire éprouver par la pratique les qualités de rigueur et de ténacité nécessaires à ce travail.
- Montrer la diversité des concepts optiques nécessaires pour la compréhension, la réalisation, l'alignement et l'utilisation d'un montage optique.
- Développer l'implication, l'autonomie, le regard critique et la prise d'initiative des étudiants en leur laissant le temps nécessaire pour surmonter les difficultés théoriques et expérimentales rencontrées, permettant une appropriation complète du projet.

# CENTENAIRE DE LA DÉCOUVERTE DE L'EFFET BRILLOUIN

#### Jean-Charles BEUGNOT<sup>1\*</sup>, Philippe DJEMIA<sup>2</sup>, Jérémie MARGUERITAT<sup>3</sup>

- <sup>1</sup> Institut FEMTO-ST, Univ. Bourgogne Franche-Comté, UMR 6174, Besançon, France
- <sup>2</sup> LSPM, CNRS-3407, Université Sorbonne Paris Nord, Villetaneuse, France
- <sup>3</sup> Université de Lyon, Université Claude Bernard Lyon1, CNRS, Institut Lumière Matière (ILM) UMR 5306, Villeurbanne, France

En 1922, Léon Brillouin publie seul et en français, dans les comptes rendus de physique un article sur la diffusion de la lumière par des ondes acoustiques d'origine thermique. Il démontre que ces ondes acoustiques induisent un décalage en fréquence de la lumière diffusée. L'invention des lasers a rendu cette diffusion très efficace et permis de nombreux développements technologiques et industriels en spectroscopie des matériaux, microscopie médicale, lasers et capteurs distribués à fibres optiques.



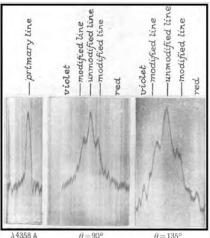


Figure 1: À gauche, copie de la première page de l'article publié par Léon Brillouin en 1922 [1]. À droite, vérification expérimentale de la diffusion Brillouin dans le benzène par E. Gross en 1930. Source [2], avec autorisation ©Nature.

#### https://doi.org/10.1051/photon/202211426

eux ans après la publication de sa thèse, Léon Brillouin publie son travail sur la diffusion de la lumière par des ondes acoustiques d'origine thermique [1]. Ce travail théorique dont on trouve des traces dans les notes de Brillouin dès 1914 [2], avait pour objectif initial de compléter la théorie d'Einstein sur les solides avec le modèle spécifique de température de Debye dans le but de définir un solide parfait (en analogie aux gaz parfait) [3]. Dans cet article, il pose la question comment la présence d'une onde élastique dans un milieu transparent trouble t'elle la propagation d'un rayon lumineux? Il aborde cette question *via* la notion d'ondes et une construction

<sup>\*</sup>jc.beugnot@femto-st.fr

géométrique de l'interaction. Il propose une relation analytique qui lie la fréquence de la lumière diffusée à la longueur d'onde de la source et à la vitesse des ondes élastique (voir encart). Léon Brillouin écrit à la fin de son introduction (Fig. 1) que ce phénomène est à peine perceptible et la vérification expérimentale est très difficile de par le très faible écart en fréquence entre les deux ondes optiques (quelques GHz) et de la nécessité d'une source de lumière intense pour générer des ondes acoustiques dans un matériau. Six ans plus tard, le physicien indien C. V. Raman observe une diffusion inélastique à plus haute fréquence due aux vibrations moléculaires de la matière, puis en 1930, le physicien Russe Evgueni Gross valide finalement la théorie de Brillouin en mesurant la diffusion dans des liquides [2]. La qualité de la mesure est impressionnante pour l'époque car les ondes diffusées dans le Benzène pour des angles de diffusion de 90° et 135° sont décalées respectivement de 4.7 pm (5 GHz) et 6.3 pm (6.6 GHz) par rapport à l'onde incidente. Cette mesure du spectre diffusé en fonction de l'angle de diffusion (k, ks) par Gross démontre sans ambiguïté que les prédictions de Brillouin sont correctes.

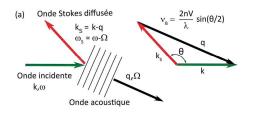
Ainsi, une mesure précise des fréquences des ondes diffusées permet de déterminer la vitesse du son et les constantes élastiques qui régissent la cohésion du matériau (voir encart). Tout d'abord réservée aux milieux transparents (solide et liquide) via l'utilisation des ondes acoustiques de volume (compression et cisaillement), la diffusion Brillouin a pu être utilisée avec des ondes acoustiques de surface pour des milieux plus opaques aux ondes électromagnétiques. L'onde de surface la plus rencontrée est l'onde de Rayleigh qui se propage parallèlement à la surface d'un milieu semi infini ou épais, avec une vitesse plus faible que la vitesse du son transverse. La pression et la température peuvent aussi être modifiées et étudiées lorsqu'une enclume diamant, un cryostat/four est couplé au spectromètre Brillouin. R. Vacher du laboratoire Charles Coulomb à Montpellier a fortement participé aux développements de ces méthodes.

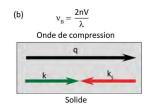
Avec l'invention des lasers dans les années 1960, les phénomènes de diffusion de la lumière (Rayleigh, Brillouin et Raman) se sont imposés comme des outils puissants pour la caractérisation des propriétés optiques, élastiques et chimiques dans

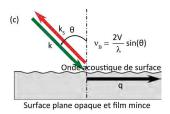
la matière condensée. La possibilité d'utiliser des sources monochromatiques puissantes permet d'observer plus directement le caractère non linéaire des interactions. Chiao et Townes ont démontré en 1964 ce que l'on appelle l'effet Brillouin « stimulé » [4]. C'est à dire la possibilité de générer de manière cohérente une onde acoustique hypersonore en illuminant un matériau avec une seule onde optique incidente. Sous certaines conditions, toute la lumière peut être réfléchie dans le régime de « miroir Brillouin ». L'arrivée des fibres optiques dans les années 70 où les ondes optiques sont guidées et interagissent avec la matière sur de très grandes longueurs ont rapidement montré que la puissance optique était limitée à quelques milliwatt pour les transmissions optiques longue distance à cause de cet effet de miroir Brillouin. Pour des sources de lumière continue ou pour des impulsions supérieures à quelques nanoseconde (temps de vie de l'onde acoustique dans la silice), la lumière transmise est saturée et toute la lumière est réfléchie. Cet effet est encore aujourd'hui très limitant pour les lasers et les lidars à fibres optiques. Néanmoins, l'onde stokes rétrodiffusée possède une meilleure • • •

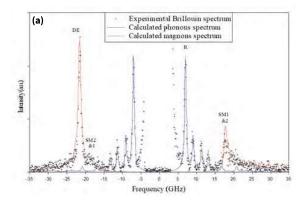
La diffusion inélastique de la lumière par des ondes acoustiques se caractérise par un décalage de la fréquence de l'onde diffusée dans la gamme du GHz à quelques centaines de GHz (i. e. <1cm<sup>-1</sup> à 5cm<sup>-1</sup>). Lorsqu'une onde incidente est diffusée par une onde acoustique, l'onde Stokes est diffusée et décalée en fréquence par effet doppler. Dans le cas général (a), le décalage en fréquence dépend de la vitesse des ondes acoustiques mises en

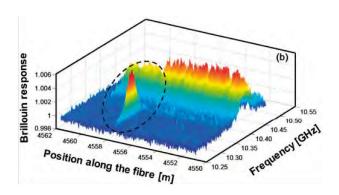
jeu, de la longueur d'onde de la source et de l'angle de diffusion entre l'onde incidente ( $\mathbf{k}$ ) et l'onde diffusée ( $\mathbf{k}_s$ ). Dans un solide ou un guide d'onde, représenté dans le cas (b), la géométrie de rétro-diffusion impose un angle plat entre les ondes électromagnétiques et les ondes acoustiques de compression. Il est également possible de mettre en jeu des ondes acoustiques de surface dans des films minces ou des matériaux opaques (c).











cohérence que l'onde incidente grâce à l'inertie de l'onde acoustique. Cet effet de laser Brillouin est très largement mis à profit pour améliorer les performances des lasers.

Au début des années 70, John Sandercock développe considérablement la spectroscopie Brillouin en concevant un spectromètre basé sur le balayage de l'espacement d'une cavité Fabry-Pérot qui permet un très bon filtrage des raies Brillouin [5]. En d'autres termes, pour chaque longueur d'onde transmise, les photons sont détectés par un compteur de photons et l'obtention d'un spectre peut nécessiter plusieurs heures d'acquisition si la réponse du milieu est faible. Néanmoins le tandem Fabry-Pérot offre une réjection de la raie élastique inégalée et la possibilité d'explorer de larges gammes de fréquences (de qqs GHz à 1500 GHz), ce qui en fait toujours un outil de choix pour l'étude des matériaux solides tels que les couches minces, les membranes et même les nanoparticules. Plus étonnamment, les propriétés magnétiques (anisotropies magnétiques, aimantation, facteur

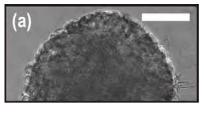
**Figure 2 :** (a) Rétrodiffusion Brillouin par des ondes acoustiques (R:Rayleigh) et de spin (DE : Damon-Eshbach) de surface dans un alliage ferromagnétique  $Fe_{80}Ni_{20}$  d'une épaisseur de 323 nm. (b) Mesures distribuées de la rétrodiffusion Brillouin le long d'une fibre optique, le spectre entouré correspond à un point chaud. *DOI : 10.1109/JLT.2010.2073443 avec autorisation © OSA*.

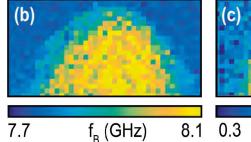
gyromagnétique) peuvent également être étudiées par diffusion Brillouin. Cette fois-ci, c'est le couplage magnéto-optique de la lumière avec les ondes de spin (fluctuation de l'aimantation) qui provoque le déplacement de la fréquence Brillouin (Fig. 2a). Il se trouve que ce couplage est extraordinairement fort et a favorisé l'essor rapide dans les années 80 des études de films minces, bicouches et multicouches qui sont utilisés dans les dispositifs magnéto-résistifs (prix Nobel 2007 Gründberg & Fert). Récemment, la diffusion Brillouin est devenue l'outil idéal pour quantifier l'interaction Dzyaloshinskii-Moriya à

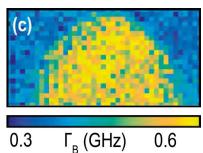
l'interface entre un métal et un matériau ferromagnétique.

Les années 90 voient également apparaître la possibilité de stimuler la diffusion Brillouin via l'utilisation de deux ondes optiques contra propagative. Par exemple, dans une fibre optique dont la fréquence Brillouin est de l'ordre de 11 GHz (pour une onde incidente à 1550 nm), l'avènement des modulateurs électro optique et des filtres de Bragg a permis le développement des capteurs distribués de température et de contraintes. En effet, la modification locale de la vitesse des ondes élastiques par la température ou par une contrainte

**Figure 3 :** Image en microscopie optique (a) d'un sphéroïde de cellules tumorale et les cartes micro-Brillouin (fréquence de résonance et largeur à mi-hauteur) correspondantes (b et c). *DOI : 10.1364/BOE.401087 avec autorisation* © *OSA*.







#### **EXPÉRIENCE MARQUANTE**

Au cours des 10 dernières années, la spectroscopie Brillouin dans les matériaux biologiques a pris également une place importante. Il est en effet possible d'extraire de ces mesures la rigidité (position du pic) et la viscosité (largeur du pic) et de suivre l'évolution des propriétés mécaniques d'un milieu biologique en fonction de stimuli externes ou lors de la croissance cellulaire.

mécanique peut être localisée par une mesure de temps de vol de l'onde diffusée et le décalage en fréquence renseigne de manière absolue sur la température ou les contraintes locales (Fig. 2.b).

Au cours des 10 dernières années, la spectroscopie Brillouin dans les matériaux biologiques a pris également une place importante. Il est en effet possible d'extraire de ces mesures la rigidité (position du pic) et la viscosité (largeur du pic) et de suivre l'évolution des propriétés mécaniques d'un milieu biologique en fonction de stimuli externes ou lors de la croissance cellulaire. Ce domaine, aujourd'hui appelé Bio-Brillouin, s'est particulièrement développé, d'une part grâce au développement de la micro-spectroscopie confocale et d'autre part par le développement d'un spectromètre basé sur un élément optique appelé VIPA (Virtual Image Phase Array). Le VIPA est un étalon Fabry-Perot qui disperse spatialement la lumière et offre avec des caméras CMOS des temps d'acquisitions inférieurs à une seconde par spectre dans les matériaux biologiques. Ces très bonnes

performances permettent la cartographie du signal Brillouin dans des milieux biologiques qui peut être corrélée avec les propriétés mécaniques du système et de potentielles modifications induites par des stimuli extérieurs ou une pathologie (Fig. 3).

Après cent ans, l'effet Brillouin est toujours largement utilisé expérimentalement (sources visible, UV, IR, RX) et dans des applications (spectroscopie, microscopie, biologie, lasers, capteurs, mécanique, magnétisme) qui s'étendent bien au-delà de la matière condensée. L'utilisation de lasers et de systèmes de mesures optoélectroniques performants permettent aujourd'hui d'envisager des utilisations conjointes des diffusions Raman et Brillouin pour caractériser la matière de l'échelle microscopique à macroscopique. Ce centenaire est aussi l'opportunité de se rappeler qu'au-delà de cette diffusion qui porte son nom, Léon Brillouin a contribué de manière exceptionnelle à la Science en abordant avec pertinence et originalité la physique des ondes.

## RÉFÉRENCES

[1] L. Brillouin, Annales de physique 9, 88-122, (1922).

[2] E. Gross, Nature **126**, 201-202 (1930) & Nature **129**, 722-723 (1932).

[3] R. Mosseri "Léon Brillouin à la croisée des ondes," Belin (Paris, 1999).

[4] R. Y. Chiao, C. H. Townes, and B. P. Stoicheff, Physical Review Letters 12, 592-595 (1964).

[5] J. R. Sandercock, Optics communications 2, (1970).

