N°114

Photoniques

LA LUMIÈRE ET SES APPLICATIONS

FOCUS
Photonique en Métropole Lilloise

OSEZ L'OPTIQUE
Microscope tomographique (OCT)

COMPRENDRE
Génération de Second-Harmonique

ACHETER
Fibres optiques pour la spectroscopie

DOSSIER

MICROSCOPIE DE FLUORESCENCE

- Localisation nanométrique de molécules uniques par modulation du signal de fluorescence
- Plus vive, plus nette : la microscopie STED du cerveau
- Des nanotorches pour étudier les matériaux nanostructurés
- Améliorer la résolution de la microscopie optique de fluorescence

France/EU : 19 € | Reste du monde : 25 €

iXblue

Fibres, composants, et systèmes laser pour environnements sévères.

Fibres
Spéciales

Modulateurs
Electro-optiques

Mux Demux

Bancs
micro-optiques
intégrés

Amplificateurs
optiques à faible
bruit/Tranceivers

www.ixblue.com | contact.photonics@ixblue.com

Photoniques

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

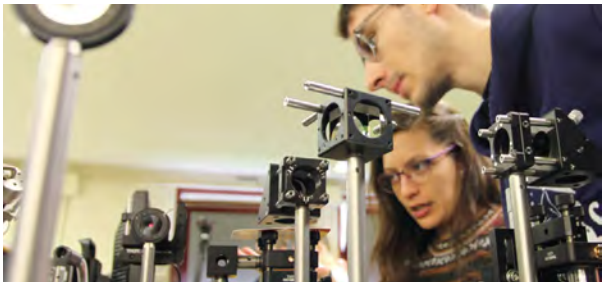
Bonnes résolutions

Coup de tonnerre sur la microscopie lorsque le physicien allemand Ernst Abbe montre à la fin du XIX^{e} 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.

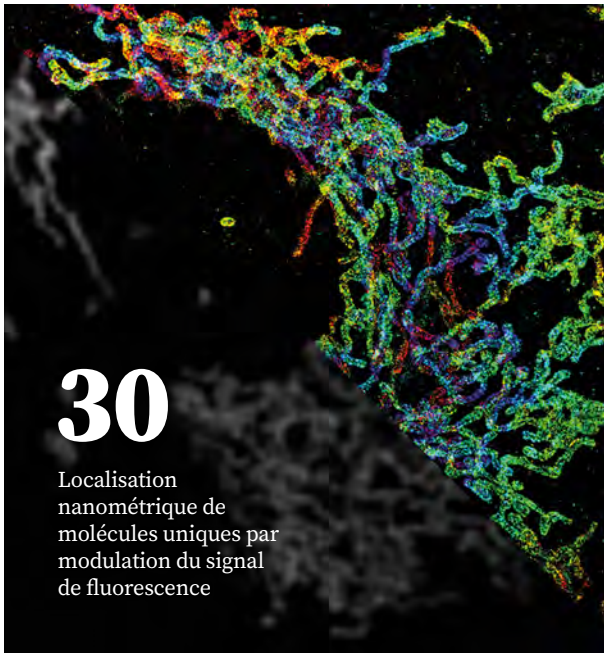
Je vous souhaite une bonne lecture.



Sommaire

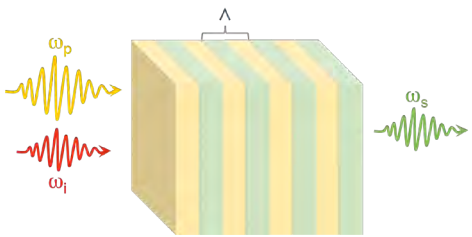
www.photoniques.com N° 114

17 OSEZ L'OPTIQUE
Microscope tomographique (OCT)



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

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



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 25
Ardop 41
Comsol 19
Edmund Optics 23, 29
Hamamatsu 43
HTDS 15
IDIL 57
Imagine Optic 31
iXblue ..... IIe de couv.
Laser Component 55
Lumibird 39
MKS Newport ..... IVe de couv.
Opton 35
Oxford 53
Scientec 59
Spectrogon 49
Toptica 33, 47

Crédit photo (couverture) : © iStockPhoto

L'édito de la SFO

ARIEL LEVENSON
Président de la SFO

Nos jeunes, notre SFO

OPTIQUE 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

Pascale 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.

21 adhérents à Laser World of Photonics

L'industrie internationale de la photonique s'est retrouvée au Laser World of Photonics à Munich du 26 au 29 avril : près de 15 000 visiteurs et 900 exposants. L'occasion pour la photonique française de mettre en avant ses expertises, au sein du pavillon français ou en dehors. Photonics Bretagne et 21 de ses adhérents y exposaient : BKtel Photonics, Cailabs, Idil Fibres Optiques, iXblue, Le Verre Fluoré, Lumibird, Oxxius, HEF Groupe (Kerdry), Aixemtec, Alpha-RLH, ALPhANOV, Amplitude, Azurlight Systems, EXFO, Irisiome Solutions, Laser Components, Leukos, OptoSigma, SEDI-ATI Fibres Optiques, Somos, et Thales.

OIP4NWE soutient Pilot Photonics

Photonics Bretagne et les autres partenaires du projet Interreg North-West Europe OIP4NWE ont remis un chèque de 50 000€ à Pilot Photonics à l'occasion du salon Laser World of Photonics à Munich. Pilot Photonics a déjà développé une conception laser accordable dans la fonderie SMART Photonics InP. Ce bon leur offre la possibilité de développer davantage le laser pour permettre un fonctionnement à haute température sans refroidisseur. Le laser est entre autres utilisé dans les applications de détection par balayage et d'imagerie.

PHOTONICS BRETAGNE REÇOIT UNE DÉLÉGATION NÉERLANDAISE

Le 17 mai dernier, Photonics Bretagne a accueilli une délégation néerlandaise : PhotonDelta, Wageningen University & Research, FME, MantiSpectra, perClass, VAA Data Works, accompagnés de l'ambassade des Pays-Bas en France. L'objectif était d'échanger autour de la photonique et de l'agroalimentaire / agriculture afin notamment d'initier des projets collaboratifs. Au programme : visites de Photonics Bretagne, Oxxius, Idil Fibres Optiques et Copeeks, pitchs (Photon Lines, Kerdry/HEF Groupe, Institut Foton, Nokia, Arvalis…) et networking. Une journée qui a démontré de belles complémentarités entre les 2 territoires !

Colloque agrophotonique Québec-Bretagne : franc succès pour cette 2nde édition

Coorganisé par Optech, Optonique, Biopterre, Photonics Bretagne et la Zone Agtech, en partenariat avec Bretagne Développement Innovation et Enterprise Europe Network, la 2ème édition du Colloque virtuel Agrophotonique Québec-Bretagne a rencontré un franc succès ! Plus de 100 acteurs des filières agricoles et photoniques (donneurs d'ordre, offreurs de solutions photoniques, équipementiers / intégrateurs, instituts ou laboratoires de recherche…) se sont inscrits sur la plateforme de réseautage B2match. Ainsi, ils ont pu assister aux 2 demi-journées de conférences les 11 et 12 mai, aux 4 tables rondes thématiques (imagerie, sources lumineuses, capteurs, IA…) et aux nombreuses sessions de rendez-vous d'affaires (ouvertes jusqu'au 20 mai).

La 1ère demi-journée était consacrée à la production végétale. Mesure de nitrates, détection précoce de maladies, désinfection des surfaces, tour d'horizon des besoins de la filière…: Biopterre, Hortau, Optech, Vegepolys Valley, Adsol et Damatex ont offert des présentations de grande qualité.

La 2ème demi-journée quant à elle, se concentrait sur les filières de l'élevage et de l'aquaculture, avec Innôzh, Technovet Equine, Idil Fibres Optiques, Photonics Bretagne, CEA-tech Bretagne, 3D Ouest, Fermes marines du Québec et le Ceva. Du spectromètre portable pour l'alimentation équine à la cartographie des algues par imagerie, en passant par le scanner 3D pour les bovins, les sujets ont suscité beaucoup d'intérêt.

Un bel événement au croisement des filières agricoles et photonique qui a su tenir ses promesses, à savoir créer des synergies entre les acteurs québécois et bretons !

AGENDA

- **Optique Nice**
  4-8 juillet 2022, Nice
- **OFS**
  29 août – 2 septembre 2022, Alexandria (Etats-Unis)
- **ECOC**
  18 – 22 septembre 2022, Bâle (Suisse)

Salon Vision

OPTITEC sera présent sur le salon international VISION qui se déroulera du 04 au 06 octobre 2022 à Stuttgart.

Lieu de rencontre de la branche du traitement d'images industriel, il regroupe les derniers développements et innovations du traitement d'images industrielles (systèmes du traitement d'images, composants,...).

Contact: Camperi-Ginestet, Directeur Adjoint Opérations

christophe.camperi@pole-optitec.com

AGENDA

■ **Le Business est dans le Pré « Développement économique et accélération industrielle »**
8 septembre 2022, Aix-en provence

Après un franc succès lors de nos 2 dernières éditions, votre événement inter-réseaux revient avec une édition spéciale «Développement économique et accélération des entreprises». Nous vous invitons cette année encore dans un lieu d'exception : Le château du Seuil nous ouvrira ses portes pour la journée... Une opportunité unique de développer votre business et votre réseau tout en exposant votre activité dans un cadre convivial.

Cette nouvelle édition sera l'occasion de vous mettre en avant des Opérateurs Technologiques et des Offreurs de Services à travers des villages thématiques :
- Village Smart Tech
- Village Services
- Village Start-up
- Village Economie circulaire
- Village Délégation Régionale et Grands Comptes

Plus d'infos sur : https://www.eventbrite.fr/e/billets-journee-inter-reseaux-le-business-est-dans-le-pre-3eme-edition-290222843337?aff=erelexpmlt

RETOUR SUR LE SALON LASER WORLD OF PHOTONICS

L'industrie internationale de la photonique s'est à nouveau réunie au salon Laser World of Photonics (LWoP) 2022 à Munich du 26 au 29 avril. OPTITEC a accompagné les entreprises CILAS, CLAVIS, ISP SYSTÈMES, SAVIMEX, SOLNIL et SYMETRIE sur le pavillon France.
Le salon est une étape importante pour une industrie en plein essor. Plus de 900 exposants de plus de 30 pays y ont exposé (2019 : 1325 exposants de plus de 40 pays), dont 15 stands communs nationaux et internationaux. Après l'Allemagne, les dix premiers pays exposants étaient les États-Unis, la France, la Grande-Bretagne et l'Irlande du Nord, la Suisse, la Chine, la Lituanie, les Pays-Bas, le Canada, la Finlande et le Japon.
Plus de 15 000 visiteurs se sont rendus à Munich. C'est un bon 80% du niveau des participants du salon lors de l'édition 2019. 39 % des visiteurs venaient de l'étranger, les États-Unis et Israël étant en tête.
Pour la première fois, le « Monde de Quantum » a fourni une scène à la communauté quantique internationale. Il a également mis en évidence le rôle central que joue la photonique dans des domaines tels que la technologie médicale, l'électro-mobilité et la fabrication industrielle.
Organisé pour la première fois dans son propre hall, il a rapidement suscité des commentaires positifs : plus de 60 % de tous les participants au salon ont visité ce nouvel espace, et plus de 90 % d'entre eux étaient intéressés par l'offre selon l'enquête menée par les organisateurs du salon. Il s'agit actuellement de la plus grande plate-forme au monde pour connecter la science, l'industrie et les utilisateurs du domaine de la technologie quantique, fournir les dernières informations sur les résultats de recherche actuels et présenter des exemples d'applications initiales de cette technologie disruptive.
Contact : Christophe Camperi-Ginestet, Directeur Général Adjoint - Opérations
christophe.camperi@pole-optitec.com / 06 70 33 82 79

Retour sur le webinaire CLAVIS : Optical-Calculation, vos calculs et simulations optiques en ligne

Le Pôle Optitec en partenariat avec Clavis a organisé le 17 mai dernier un webinaire sur la thématique : « CLAVIS : Optical-Calculation, vos calculs et simulations optiques en ligne » qui a rassemblé une vingtaine de participants.
Lors de ce webinaire, Clavis a présenté son logiciel de calculs photoniques et de simulation optique en ligne destiné aux ingénieurs, chercheurs, techniciens et enseignants. CLAVIS développe un nouvel outil interactif de calculs/modélisations en mode SAS pour aider à l'étude, l'analyse et la conception optique/optoélectronique. Ce logiciel en ligne couvre un large spectre de la photonique et s'adresse aussi bien aux experts qu'aux débutants.
Plus d'infos sur : https://www.optical-calculation.com/

Une présence forte du pôle et de ses adhérents à Laser World of Photonics Munich

ALPHA-RLH et ses adhérents étaient présents du 26 au 29 avril 2022 sur le Pavillon France, coordonné par Business France et Photonics France. 15 membres du pôle, dont 11 en Nouvelle-Aquitaine, ont exposé leurs technologies : ALPhANOV, ARDOP Industrie, Azurlight Systems, Bloom Lasers, CILAS, Femto Easy, GLOphotonics, GoyaLab, IDIL Fibres Optiques, Irisiome, ISP System, Le Verre Fluoré, Leukos, Somos Nanotec et Spark Lasers.

Une nouveauté sur le salon cette année avec un hall « World of QUANTUM » dédié aux technologies quantiques et à leurs applications. On pouvait y retrouver AUREA Technology qui présentait ses instruments optiques pour le quantique, ainsi que le NAQUIDIS Center, centre d'innovation dont ALPHA-RLH est partenaire. Soutenu par la Région Nouvelle-Aquitaine, il a pour but d'accélérer la recherche dans le quantique dans trois domaines : les capteurs, la communication et les composants.

Le salon a également permis au pôle de promouvoir deux projets européens :

- **NewSkin,** qui vise à accélérer l'industrialisation de nouveaux procédés de traitement de surfaces,
- **PhotonHub Europe,** qui soutient l'innovation des entreprises en facilitant l'adoption des technologies photoniques et favorise les relations avec des fonds d'investissement spécialisés dans les entreprises deep tech, qui seront présents à INPHO Venture Summit les 13 et 14 octobre 2022 à Bordeaux : https://www.inpho-ventures.com/

PME TOUR DGA EN NOUVELLE-AQUITAINE ET OCCITANIE

Le 12 avril 2022, le ministère des Armées et ses partenaires : les pôles de compétitivité ALPHA-RLH, Aerospace Valley, le Pôle Européen de la Céramique et le cluster PRIMUS, ont réuni 120 participants à Agen lors d'une rencontre régionale avec des acteurs ministériels et institutionnels, en présence de donneurs d'ordre du domaine de la défense.

La matinée a été consacrée à la présentation de différents dispositifs : la politique du ministère des Armées en faveur des PME et ETI, le dispositif Diagnostic Cyber Défense, le soutien à l'innovation et au recrutement…Puis une table ronde avec la DGA, Airbus Defence and Space, MBDA, Cegelec et SERMA Technologies a abordé diverses solutions possibles pour faire face aux pénuries d'approvisionnement en matières premières industrielles.

L'après-midi a été dédiée à des sessions d'entretiens BtoG (Business to Government) avec des représentants du ministère et des rendez-vous BtoB entre industriels : donneurs d'ordre, PME et ETI offreuses de technologies pour la défense. Quelque 200 rendez-vous ont été organisés avec succès !

ALPHA-RLH lauréat d'un nouveau projet européen

Le projet PIMAP+ touchant à sa fin, ALPHA-RLH poursuit son aventure de coordinateur dans le cadre d'un nouveau projet européen dont il est lauréat : PIMAP4Sustainability.

Le consortium, composé de six clusters européens spécialisés dans les domaines de la photonique, des technologies de fabrication avancées, de la métallurgie et de l'aérospatiale, soutiendra les PME européennes sur trois enjeux majeurs à leur développement : l'utilisation des technologies photoniques pour stimuler leur potentiel d'innovation, la transition digitale et environnementale et la maximisation de leur résilience.

Un budget de 1,05 millions d'euros permettra aux entreprises lauréates de deux appels à projets de financer leurs projets d'innovation transnationaux, mais aussi acquérir des connaissances nécessaires à leur transition écologique/digitale et à leur internationalisation.

Prochaine étape ? Le lancement officiel de PIMAP4Sustainability les 26 et 27 septembre 2022 à Prague dans le cadre de la 8e édition de l'European Cluster Conference.

AGENDA

- **Optique Nice 2022**
  4 au 8 juillet à Nice
- **Les Challenges de l'IoT**
  5 juillet à Limoges
- **Journée PHAROS « Les communications sécurisées »**
  15 septembre à Brive
- **INPHO Venture Summit**
  13 et 14 octobre à Bordeaux

Tous les évènements sur www.alpha-rlh.com

NOUVEAUX MEMBRES

Bienvenue à nos nouveaux adhérents : **Photonics Groupe, Openindus, Onera, Institut des Sciences de la Lumière, Acal Bfi, Ondes (Groupe IMS), Teratonics, Lynred, Optosigma, Imasolia.**

French photonics days

Photonics France, SupOptique Alumni, Minalogic et le Cluster Lumière, en partenariat avec Manutech Sleight et l'Institut d'Optique G.S. et avec le soutien de Métropole Saint-Étienne, co-organisent la 4ème édition des French Photonics Days à Saint-Etienne sur le thème « photonique pour l'Affichage, l'Éclairage et le Manufacturing ». Labellisé *Biennale du Manufacturing*, l'événement aura lieu les 20 et 21 octobre au Palais des Congrès de Saint-Étienne, sur deux jours. Conçu pour un public technique mais non spécialiste, French Photonics Days a pour ambitions de faire le point sur le développement de nouvelles technologies photoniques, de présenter leurs applications et leurs marchés et de réfléchir aux enjeux majeurs de la filière comme formation et le recrutement.

Pour découvrir le programme et s'inscrire : https://www.billetweb.fr/french-photonics-days4

AGENDA

- **Business meeting défense**
  Septembre 2022, Paris
- **French Photonic Days**
  20- 21 octobre 2022, Saint-Etienne
- **Journées securité optique et laser (JSOL)**
  8-9 novembre 2022, Bordeaux
- **Photonics online meetings**
  2022 novembre 2022, Online

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

Photonics online meetings :
Les inscriptions sont ouvertes

La 5e édition de Photonics Online Meetings, événement business virtuel d'envergure européenne dédié aux technologies photoniques, se tiendra le 22 novembre 2022. L'événement réunira les principaux donneurs d'ordre et fournisseurs de technologies et de services photoniques.
Un dispositif exceptionnel de rencontres préprogrammées entre fournisseurs de de la filière photonique et les donneurs d'ordre fait de cette journée un événement unique au cours duquel se tissent des partenariats et des opportunités business. L'événement sera rythmé par un riche programme de conférences, de démonstrations et de présentations techniques animées par des experts.
Pour plus d'informations et pour s'inscrire :
https://onlinemeetings.photonics-france.org/

APPEL À COMMUNICATION : JOURNÉES SÉCURITE OPTIQUE ET LASER (JSOL) 8-9 NOVEMBRE 2022 À BORDEAUX

Organisées par le Comité National de Sécurité Optique de Photonics France, la 4e édition des Journées Sécurité Optique et Laser au travail se déroulera les 8 et 9 novembre 2022 à Bordeaux, à l'Institut d'Optique Graduate School. Ces journées, à destination des services hygiène et santé des entreprises, des services médicaux, des régies des salles de spectacles ou des services de santé au travail et plus largement des intervenants en santé au travail, ont pour objectif de présenter les risques liés à l'utilisation des lasers ou sources optiques et de l'évolution de la réglementation.
Nous recherchons des intervenants pour présenter les risques liés à l'utilisation des lasers ou sources optiques, les bonnes pratiques, ainsi que l'évolution de la réglementation.

Vous souhaitez proposer une conférence ?
Envoyez votre résumé à cnso@photonics-france.org.

[NOUVELLE COORDINATRICE]

Le Hub Optics & Photonics accueille sa nouvelle Coordinatrice, Najwa ABDELJALIL, Ingénieure Optique

Najwa aura pour mission de vous accompagner dans le développement de votre structure :
• Mise en relation
• Animation et valorisation de l'écosystème,
• Montage de projets ...
Elle sera votre contact Optics & Photonics au sein de Systematic Paris-Region. Bienvenue à elle !

QUANDELA DÉVOILE PERCEVAL
UN OUTIL OPEN SOURCE POUR COMPRENDRE L'ORDINATEUR QUANTIQUE OPTIQUE

Quandela annonce la sortie de sa boîte à outils Perceval. Un logiciel open source créé pour comprendre le fonctionnement d'un ordinateur quantique optique et de le simuler. Grâce à une API Python simple et orientée objet, Perceval fournit des outils permettant de :
• **composer** des circuits à partir de composants optiques linéaires,
• **définir** des sources de photons uniques
• **manipuler** des états de Fock
• **exécuter** des simulations
• **reproduire** des articles expérimentaux publiés
• **expérimenter** une nouvelle génération d'algorithmes quantiques.
Perceval est avant tout un outil complémentaire pour le développement de circuits photoniques. Ainsi il simule et optimise leur conception, modélise les comportements idéaux et réalistes. Enfin, il propose une interface normalisée pour les contrôler grâce au concept de backends.

Un maillage réussi entre 3 Hubs de Systematic

Perceval est à disposition des développeurs ainsi que la communauté scientifique et industrielle pour explorer les applications informatiques quantique photonique.
C'est une grande fierté de voir le maillage entre les 3 Hubs Optics & Photonics, Digital Engineering et Open Source de Systematic illustré par la sortie de ce logiciel open source pour l'ordinateur quantique.
Pour rappel, Systematic Paris-Region, pôle européen des DeepTech est composé de 7 Hubs et 3 enjeux avec l'objectif de créer des liens forts entre les différents domaines technologiques. Il accompagne notamment les structures dans leur développement sur tous leurs leviers (innovation, R&D, business, réseau, financement…).

En savoir plus sur Quandela…

Quandela conçoit des ordinateurs quantiques. Son objectif : apporter une réponse européenne aux défis auxquels l'industrie et le monde universitaire sont confrontés dans le monde entier. L'entreprise, fondée en 2017 par trois experts — chacun ayant acquis la réputation de leader dans son domaine — bénéficie de nombreuses années d'expérience en science fondamentale et s'appuie sur une jeune équipe de physiciens primés et d'ingénieurs accomplis.

En bref

Mihaly remporte le prix Tech'Innov
Basée à Orsay, Mihaly est une *start-up* qui développe des techniques de numérisation et d'impression de surfaces 2.5D grand format en haute résolution et couleur. Gagnante du prix Tech'Innov dans la catégorie Transformation numérique, Mihaly en repart avec une récompenses de 2 000

AGENDA

■ **WHAT'S ON chez ESIEE/ Icon Photonics,**
2 juin 2022, 9h-11h30, Champ-sur-Marne (77)

■ **Optique Nice**
4-8 juillet, Nice (06)

■ **WHAT'S ON chez Karthala**
8 septembre 2022, Orsay (91)

■ **Photonics Excellence Day**
24 novembre 2022, Institut d'Optique Graduate School, Palaiseau (91)

Organisé en partenariat avec le Forum de la Photonique, nous vous donnons rendez-vous le 24 novembre 2022 pour la journée annuelle du Hub Optics & Photonics qui se tiendra à l'Institut d'Optique Graduate School de Palaiseau. Découvrir les nouveaux usages de la photonique, discuter des dernières innovations avec les acteurs clés de la filière et construire son réseau, voilà quelques-unes des belles promesses que vous réserve cette journée !

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

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

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

Gala SupOptique

©SOAP SupOptique Art Production

Le 26 novembre 2021 se tenait le premier Gala de SupOptique organisé conjointement par l'association étudiante et SupOptique Alumni. Cette très belle soirée fut l'occasion de recevoir Nicolas Brusson (promo 2000), co-fondateur et CEO de BlaBlaCar, ainsi que de nous retrouver autour d'un buffet dînatoire et d'une soirée dansante. Ce grand rendez-vous de la famille SupOpticienne n'aurait pas été possible sans nos nombreux sponsors de la filière photonique que nous remercions chaleureusement !
Nouveau rendez-vous le 25 novembre 2022 !

Yohan BLAZY (promo 2021)
yohan.blazy@icloud.com

Comptes recruteurs

Depuis janvier 2022, SupOptique Alumni a mis en place les Comptes Recruteurs, le meilleur moyen d'accéder à une communauté de plus de 5 000 anciens, du jeune diplômé à l'expert !

- **Photoniciens :** si vous cherchez un nouveau défi professionnel, **plus de 30 offres** ultra-qualifiées vous attendent !
- **Recruteurs,** le dynamisme de la filière photonique est tel que les talents s'arrachent et l'accès à ce vivier garantit une visibilité immédiate !

Lola Courtillat (promo 2017)
espace.pro@supoptique-alumni.com

AGENDA

SC10 Acquisition, perception et traitement d'images
26/09 au 29/09/2022

SC11 Anatomie d'une caméra infrarouge
4/10 au 7/10/2022

SC12 Systèmes optroniques
8/11 au 10/11/2022 et 23/11 au 25/11/2022

EF2 Bases de l'optique
15/11 au 18/11/2022 et 29/11 au 2/12/2022

EF1 Optique sans calcul
6/12 au 8/12/2022

Tél. : 01 64 53 32 15
Plus sur : www.fc.institutoptique.fr

SupOptique Alumni et la Photonique

SupOptique Alumni, l'Association des anciens élèves de l'Institut d'Optique Graduate School, est une presque centenaire bien dynamique !
Elle offre une visibilité sur son site www.supoptique-alumni.com et confirme sa présence sur de nombreux réseaux sociaux. SupOptique Alumni propose à ses membres la possibilité de se retrouver, de s'entraider entre générations, de publier ou de lire des offres d'emploi, ou tout simplement de prendre des nouvelles « de la famille ».

Présents dans plus de 800 entreprises ou organismes, petits ou grands, les « SupOptique » restent de façon majoritaire dans le domaine de la Photonique qu'ils contribuent à enrichir.

François-Hugues GAUTHIER
(promo 76)
Président
fh.gauthier@orange.fr

Des SupOptique Alumni anime la French Tech Paris-Saclay

La communauté French Tech Paris-Saclay est une association à but non lucratif qui a pour mission de faire rayonner l'écosystème en phase avec la volonté de la Mission French Tech, le mouvement français des startups.
Plusieurs SupOptique Alumni sont très actifs dans l'animation de cette structure qui fédère les entrepreneurs locaux, dont Arnaud Peltier (WIN MS, SupOptique 2001), Valérian Giesz (Quandela, SupOptique 2012), Thibaut Mercey (SupOptique 2000).

Les Missions de la French Tech Paris-Saclay (FTPS)

- **Créer une véritable communauté d'entrepreneurs locaux,** afin de renforcer leurs liens et les partages d'expériences.
- **Développer la vision internationale et la visibilité des start-ups et porteurs de projet** du territoire, en les représentant devant diverses instances publiques et privées.
- **Renforcer l'attractivité du territoire pour les start-ups françaises et étrangères,** en facilitant leur implantation, en simplifiant l'accès à des plateformes de prototypage, en mettant en avant l'écosystème Recherche/Industrie locale.

Les principales actions

- **French Tech Central :** Il s'agit d'organiser des permanences de différents organismes, essentiellement publics et parapublics pour permettre aux start-ups adhérentes de rencontrer aisément ces acteurs.
- **DeepTech Factory Network :** Il s'agit d'une vaste étude, clôturée fin 2021, accessible à tous, pour déterminer les besoins des sociétés « deeptech » du territoire.
- **Actions de réseautage et co-organisation** d'événements thématiques sur le territoire, tels SPRING, le Mobility Energy Day, le Winter Event Career Fair ou la Journée Entrepreneuriat Étudiant.

• Nadia BENALLAL, Déléguée Générale, nadia@lafrenchtech-paris-saclay.fr
• Thibaut MERCEY thibaut@lafrenchtech-paris-saclay.fr
https://lafrenchtech.com/fr/
https://lafrenchtech-paris-saclay.fr/

HOMMAGE

C'est avec beaucoup de tristesse que nous avons appris le décès brutal de Bernard LALOUX, diplômé de l'IOGS (promo 1982).Bernard a été Directeur des Relations aux Entreprises et de la Valorisation de l'Institut d'Optique Graduate School de 2003 à 2010, une tâche qu'il avait menée avec enthousiasme et dynamisme. Il avait ensuite fondé avec succès en 2009 avec Denis Mangeot une société de conseil en développement technologique, IVEO Technologies, hébergée au bâtiment 503, dans les domaines de l'optique, de l'optoélectronique ou encore de la micromécanique. La communauté de l'optique et de la photonique rend hommage à l'un de ses fervents supporteurs et experts dévoués.

La réalité virtuelle : le futur de l'éducation

La 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 phénomènes 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 enseignant-chercheurs 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 (16e conférence internationale sur la « Near-Field Optics »)
Victoria au Canada du 29 août au 2 septembre 2022
https://nfo16.ece.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

SEMAINE SCIENTIFIQUE

MANUTECH SLEIGHT « PHOTONICS FOR HEALTH »

Minalogic et le cluster médical Novéka co-animeront la session « applications industrielles » du 5 juillet après-midi, avec l'intervention de plusieurs acteurs ayant su valoriser et industrialiser des technologies photoniques pour des applications en santé, comme par exemple Qiova pour le marquage/traçabilité de médicaments et Keranova pour la chirurgie ophtalmique. La Graduate School Manutech-SLEIGHT organise à Saint-Etienne, pour la deuxième fois cette année, cet évènement qui fédère les membres du consortium (étudiants gradués, chercheurs, entreprises partenaires).
En savoir plus :
https://manutech-sleight.com/

AGENDA

- **Conférences « Procédés Laser pour l'Industrie »**
  Les 28 et 29 juin 2022 à Saint-Etienne
- **Journée thématique Minalogic sur les technologies quantiques**
  Le 4 octobre 2022 à Grenoble
- **Le salon Vision**
  du 4 au 6 octobre 2022 à Stuttgart
- **Les « French Photonics Days »**
  les 20 et 21 octobre 2022 à Saint-Etienne dans le cadre de la Biennale du Manufacturing

CONTACTEZ MOI

Florent Bouvier
Responsable Optique Photonique chez Minalogic
Tél : +33 (0)6 35 03 98 52
Florent.bouvier@minalogic.com

Un franc succès pour l'événement international Minalogic Business Meetings 2022

La 8ème édition des Minalogic Business Meetings, événement-phare du pôle en matière d'open innovation, s'est tenue le 31 mai 2022 au Stade des Alpes à Grenoble. Cette année, les participants étaient particulièrement nombreux avec plus de 435 personnes, dont 186 offreurs de solutions numériques et 189 donneurs d'ordre, et 2000 rendez-vous ont été réalisés. En parallèle, des conférences ont été données sur le thème de l'innovation durable, et notamment les concepts émergents comme le management environnemental, le Green Code ou l'innovation frugale.
Pour en savoir plus : https://www.minalogicbusinessmeetings.com/

MINALOGIC C'EST :
500 ADHÉRENTS, DONT 430 ENTREPRISES (DONT 95 EN PHOTONIQUE)
740 PROJETS LABELLISÉS ET FINANCÉS DEPUIS 2005
+ DE 10000 RENDEZ-VOUS B2B DEPUIS 2005

Réunion annuelle des partenaires du projet européen PhotonHub Europe

Les pôles et plateformes photoniques régionaux participant au réseau européen PhotonHub Europe se sont réunis les 24 et 25 mai 2022 à Bruxelles. L'objectif était de faire un point d'étape sur les actions menées depuis la création de ce *Digital Innovation Hub* en 2021. Les coordinateurs de PhotonHub Europe se sont félicités de l'efficacité des actions menées : sensibilisation des acteurs, mise en relation qualifiée et structuration de projets technologiques.
Visant les PME européennes, ce réseau a obtenu de l'Union Européenne 19 millions d'euros pour financer des projets *« test before invest »*, apporter une aide à la recherche de financement et à la commercialisation, et de former et perfectionner ces utilisateurs ou primo-adoptants de technologies photoniques. Les experts techniques sont disponibles pour évaluer les besoins et les projets soumis sur le site web et orienter les entreprises vers des plateformes technologiques associées au projet.
Pour en savoir plus : https://www.photonhub.eu/

MORE THAN 6000 JOBS IN PHOTONICS!

The world's largest website for jobs in photonics

www.jobs-in-photonics.com

Amplitude

a::etris

AEMtec

II-VI

EXCELITAS TECHNOLOGIES®

LIGENTEC

NIL TECHNOLOGY

EPIC members are companies and organizations in the field of photonics covering optics, fibers, sensors, lasers, LEDs, detectors, displays. EPIC members are technology leading edge companies, covering the entire value chain from system integrator, components supplier, equipment, materials and service suppliers.

EPIC
European Photonics Industry Consortium

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.

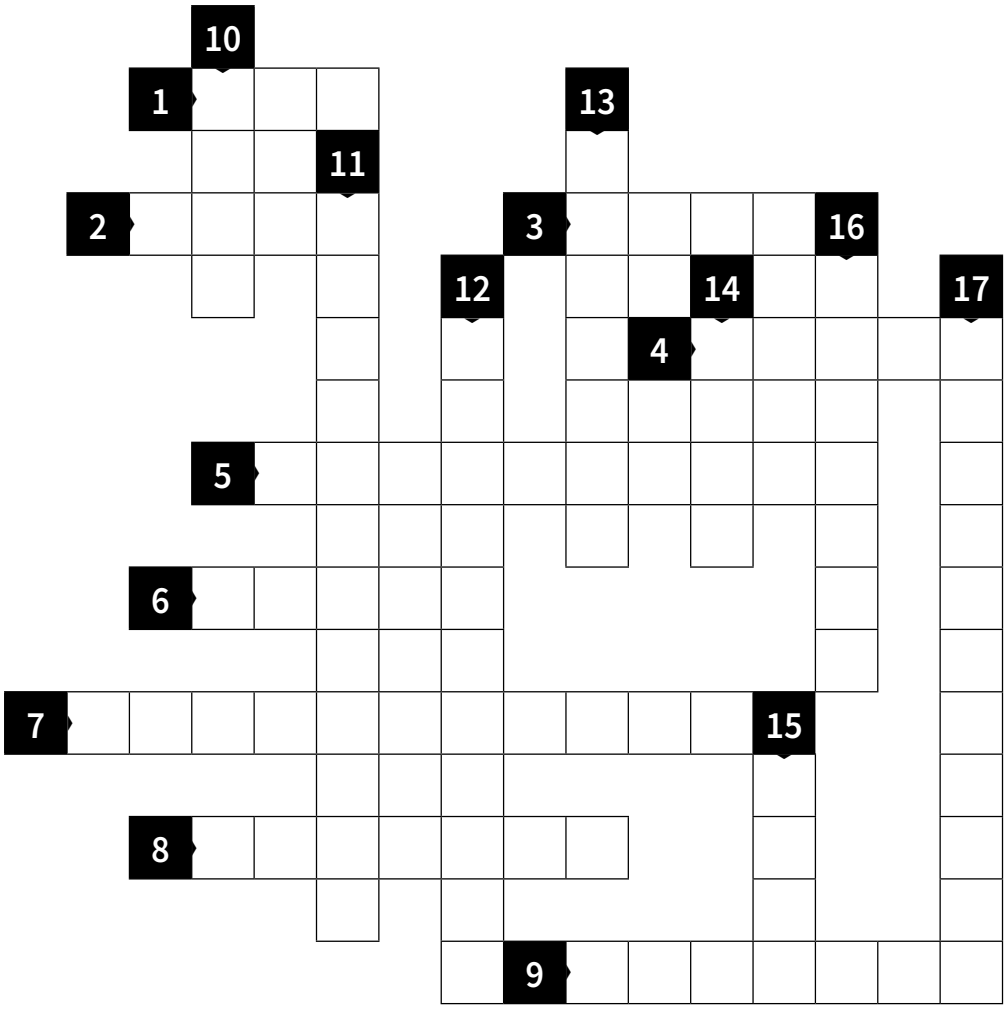
VOUS ÊTES TRÈS IMPLIQUÉ DANS LA PROMOTION DE LA PHOTONIQUE ET LE RAPPROCHEMENT ENTRE SAVOIR-FAIRE ACADÉMIQUE ET LES ACTIVITÉS INDUSTRIELLES.

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 BIGOT[1,*], Guillaume DUCOURNAU[2], Alberto AMO[1]
[1] Univ. Lille, CNRS, UMR 8523 - PhLAM - Physique des Lasers Atomes et Molécules, F-59000 Lille, France
[2] 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**

La 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 Hauts-de-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 ● ● ●

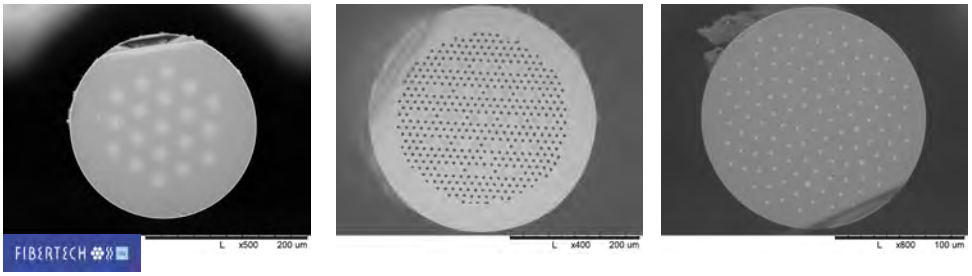


Figure 1. Exemples de fibres multi-cœurs réalisées au sein de la plateforme FTL pour des projets de recherche en télécom, combinaison cohérente de faisceaux laser et endoscopie optique (de gauche à droite). Crédits : CNRS - PhLAM

lumière mais aussi la physique des atomes froids. En plus de ses équipes de recherche, le PhLAM compte également une plateforme, FiberTech Lille (FTL), dédiée à la fabrication de fibres optiques innovantes. Cette plateforme de classe mondiale concentre de nombreux équipements originaux voués à la fabrication, la caractérisation et la fonctionnalisation de fibres optiques. Cela en fait un site unique. FTL fait partie du groupement d'initiatives pour les fibres optiques nouvelles (GRIFON) regroupant les sept plateformes académiques françaises ayant une activité dans le domaine de la technologie des fibres optiques. La plateforme FTL est hébergée à l'IRCICA (Institut de Recherche sur les Composants logiciels et matériels pour l'Information et la Communication Avancée), hôtel à projets interdisciplinaires du CNRS.
Les activités de recherche de l'équipe Photonique du PhLAM s'appuient pleinement sur la plateforme FTL et agrègent des savoir-faire en théorie, conception, fabrication et mise en œuvre de fibres optiques de spécialité, parmi lesquelles on trouve notamment les fibres micro-structurées proposées au milieu des années 90 [1]. Offrant une large variété de propriétés optiques et, plus généralement, de mécanismes de guidage, ces fibres sont étudiées au sein de l'équipe dans des contextes tels que la photonique non-linéaire, l'endoscopie optique, les lasers, les télécoms ou encore les capteurs. Dans tous ces domaines, les fibres multi-cœurs ouvrent de nouveaux horizons. On pense bien sûr aux télécoms à très hauts débits, pour lesquels de telles fibres permettent de multiplexer spatialement l'information, mais aussi à l'endoscopie sans lentille qui permet une imagerie non-invasive par mise en forme du front d'onde en entrée de fibre. Depuis peu, ces fibres sont aussi utilisées pour générer des peignes de fréquences multiples, utilisables comme références pour des mesures de distances, de la spectroscopie optique ou encore de l'imagerie rapide, par analyse des battements ou des interférences entres les raies qui composent les différents peignes.

Topologie photonique

La topologie photonique est devenue ces dix dernières années un champ d'études à forte dynamique internationale. Par la structuration astucieuse de matériaux optiques il est possible de fabriquer des puces photoniques, dites topologiques, qui offrent des canaux de transmission unidirectionnels pour la lumière [2]. Ainsi, il est possible de créer des circuits photoniques intégrés sur quelques dizaines de micromètres, extrêmement robustes aux imperfections de fabrication, et aussi de réaliser des lasers intégrés insensibles à la rétrodiffusion. Cette thématique à fort intérêt autant fondamental qu'applicatif est développée par l'équipe DYSCO du laboratoire PhLAM. Les recherches actuelles visent à imaginer de nouveaux types de matériaux topologiques pour la lumière, notamment avec des fonctionnalités actives. Une application prometteuse en cours de développement en collaboration avec l'IEMN est la fabrication de circuits topologiques pour le THz. Grâce à la taille réduite issue de la géométrie topologique, il sera possible de moduler activement sa réponse de façon performante, ce qui reste un défi ouvert à l'heure actuelle dans cette gamme de longueur d'onde.

Photonique-Terahertz

L'IEMN concentre une expertise de longue date en micro/nano-technologies. Dans la suite des activités historiques du laboratoire sur les transistors, son expertise en optique et photonique s'est progressivement orientée autour des composants sur plusieurs filières technologiques destinés à plusieurs gammes spectrales (IR, MIR, FIR-THz). Ces activités sont en particulier portées par les groupes Opto, NAM6, Anode et Photonique-Terahertz. L'IEMN se veut actif dans la communauté Terahertz française et vise à développer des applicatifs autour des composants de photonique THz, comme le contrôle alimentaire (incluant les compétences en spectroscopie du Laboratoire de Physico-Chimie de l'Atmosphère (LPCA) de Dunkerque), la métrologie, l'imagerie ou encore les applications télécoms. Sur ce point particulier, le laboratoire s'est spécialisé dans la réalisation et la mise en œuvre de transmissions de données sans fil en gamme THz, à partir de systèmes photoniques, pour la qualification des composants développés mais également pour le test système de composants actifs et passifs pour les futurs systèmes THz [3]. De tels travaux sont motivés par le fait que les réseaux de données sans fil actuels sont soumis à une pression énorme et peinent à faire face au volume toujours croissant d'informations à délivrer. La gamme de fréquences THz, grâce à des largeurs de bande importantes, peut répondre à ces défis. Un axe de travail

vise ainsi à inventer d'ambitieuses interfaces optiques/radio distribuées spatialement afin d'augmenter considérablement les performances. Grâce à cette nouvelle approche, des débits de données allant jusqu'à un térabit par seconde et des liaisons couvrant une distance jusqu'à un kilomètre sont envisageables, soit dix fois mieux que l'état de l'art actuel. Ici, les fibres et composants photoniques sont réalisés au sein de la plateforme FTL alors que les composants électroniques sont développés au sein de la Centrale de Micro Nano Fabrication (CMNF), membre du réseau national Renatech, et de la plateforme SigmaCom.

Au-delà de ces exemples, il est important de mentionner que d'autres laboratoires du campus villeneuvois sont aussi positionnés sur des recherches avancées en optique. C'est notamment le cas du LOA (laboratoire d'Optique Atmosphérique) et du LASIRE (Laboratoire de Spectroscopie pour les Interactions, la Réactivité et l'Environnement) dont les champs d'expertise couvrent l'optique et la spectroscopie. Des travaux de recherche inter-laboratoires sont menés dans ce cadre au sein du CERLA (Centre d'Études et de Recherches Lasers et Applications), à l'image de l'instrument Spidermass, capable d'analyser la composition chimique de tissus *in vivo* à l'aide d'un laser pulsé fibré et développé par des équipes des laboratoires PhLAM et PRISM (Proteomics Inflammatory Response Mass Spectrometry).

Structuration

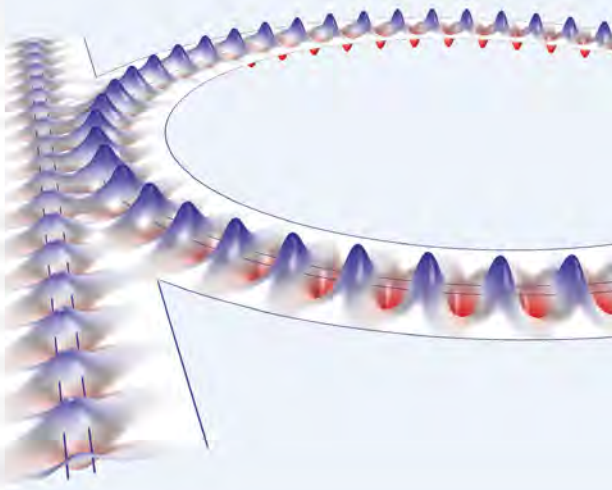
En 2013, le Conseil Régional Hauts-de-France impulsait une dynamique multi-partenariale, Rev3 (3e révolution industrielle en Hauts-de-France) misant sur la recherche, l'innovation et la formation développées dans les établissements régionaux de l'enseignement supérieur et de la recherche. La recherche en photonique a ainsi pu s'appuyer sur plusieurs programmes structurants d'envergure régionale tels que les contrats plan Etat-Région (CPER) qui mettent l'accent sur des grands enjeux sociétaux comme c'est le cas avec le CPER Photonics4Society (2017-2022) ou le nouveau CPER WaveTech (2022-2027). Notons que le soutien à l'échelle locale se manifeste également par l'apport de la DRARI (Délégation Régionale Académique à la Recherche et à l'Innovation) et de la Métropole Lilloise (MEL), soutien pouvant être renforcé par celui de l'Europe dans le cadre des actions FEDER (Fonds Européen de Développement Régional). Toujours à l'échelle régionale, la labellisation du projet I-Site Université Lille Nord Europe (ULNE) en 2017 et confirmée en 2022 s'est organisée autour de quatre hubs de recherche parmi lesquels on trouve Santé et précision ou encore Monde numérique au service de l'humain. Parallèlement à ces programmes, plusieurs initiatives d'excellence portées par des acteurs de la Région ont été labellisées au cours des dernières années. On pense • • •

ÉTUDE DE CAS

Tout a commencé avec deux seaux d'eau...

En 1870, un scientifique du nom de John Tyndall a essayé de contrôler la lumière en utilisant deux seaux d'eau, illustrant la réflexion interne totale à un public fasciné. Aujourd'hui, les chercheurs disposent d'outils plus avancés. Lorsqu'ils fabriquent et analysent des prototypes de guides d'ondes optiques, les ingénieurs actuels utilisent des logiciels de simulation numérique pour accélérer le processus de conception.

EN SAVOIR PLUS *comsol.blog/silicon-photonics*



COMSOL

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des composants et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche.

ici aux programmes EQUIPEX FLUX (Fibres pour les hauts flux) et Add4P (synthèse additive de verre pour la réalisation de composants photoniques) ou encore au LABEX CEMPI, positionné à l'interface Physique/Mathématique. Certains de ces projets se sont appuyés ou s'appuient encore sur les pôles de compétitivité ou les pôles économiques de d'innovation comme Matiken, EuraTechno, CEA-Tech ou EuraSanté. À l'échelle internationale, les laboratoires académiques, outre le portage de projets collaboratifs, sont acteurs de programmes d'échange comme les réseaux ITN ou les réseaux technologiques comme Photon-Hub.

Les liens avec le tissu industriel

Plusieurs des projets mentionnés ci-dessus impliquent des partenaires industriels et quelques partenariats sont concrétisés par la constitution de laboratoires communs avec des grands groupes basés en région (laboratoire commun LIFT du PhLAM, avec Draka du groupe Prysmian, leader mondial des câbles à fibres optiques) ou des spin-off issues de laboratoires de l'Université, comme Lightcore technologies, spécialisée, avec le PhLAM, en imagerie optique non linéaire pour des applications biomédicales et scientifiques. La collaboration avec Draka-Prysmian illustre le positionnement fort de la Région Hauts-de-France dans le domaine des télécommunications par fibre optique avec, outre l'usine de fabrication de fibres optiques de Draka-Prysmian à Billy-Bercleau, la présence sur le territoire de l'usine d'Alcatel Submarine Networks (ASN) à Calais. Les recherches en millimétrique et THz donnent également lieu à des débouchés industriels, en lien avec les laboratoires communs de l'IEMN (ST Microelectronics) ou au travers de liens forts avec les spin-off du laboratoire telles que MC2 Technologies, devenue une PME spécialiste en brouillage de drones et imagerie de sécurité, et V-Micro, spécialiste en capteurs et micro-technologies [4, 5].

Les filières de formations et les réseaux professionnels

Ce tour d'horizon ne serait pas complet sans mentionner les formations intégrant une part d'études théoriques ou appliquées dans le domaine de la photonique. De ce point de vue, l'offre disponible sur le campus de l'Université de Lille s'étend du niveau BAC+3, avec le BUT « Mesures Physiques » proposé par l'IUT de Lille, jusqu'au doctorat, avec le Master « Physique Fondamentale et Applications » dont le parcours « Systèmes complexes, Optique, Lasers » inclus plusieurs modules d'optique/photonique. Des modules similaires existent également du côté des écoles d'ingénieur comme IMT ou Polytech Lille avec pour cette dernière la spécialité « Instrumentation – Ingénierie d'Affaires », basée sur 3 cœurs techniques : photonique, chimie analytique et électronique-mesure.

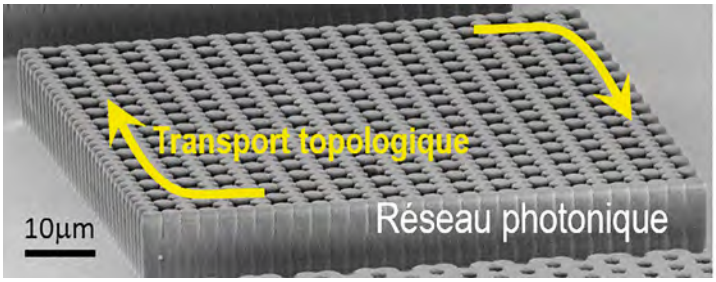


Figure 2. Exemple de circuit topologique photonique. Crédits CNRS-IEMN

Au-delà des formations académiques classiques, les chercheurs et ingénieurs de l'Université sont également particulièrement impliqués dans les réseaux professionnels ou les groupements de recherche. Au niveau régional, on pense en particulier au réseau régional Optique Photonique et Applications Laser (OPAL), soutenu par le Réseau Optique et Photonique (ROP). À l'échelle nationale, l'émulation sur les thèmes précités est favorisée par les journées de rencontre organisées par le GDR ELIOS (effets non-linéaires dans les fibres optiques et en optique intégré) et le GDR NanoTERAMIR sur le THz.

Conclusion

Cet article a mis en lumière quelques axes de recherche, savoir-faire et outils remarquables, précieux pour la recherche française en photonique. Au-delà de leur valeur individuelle, c'est bien leur regroupement sur un même site qui donne une valeur ajoutée incomparable au site lillois et qui permet l'émergence de nouveaux sujets à la frontière entre différentes thématiques, différentes communautés, en connexion avec le tissu industriel. Cette dynamique bien visible aujourd'hui se concrétise par la forte implication des acteurs lillois de la photonique dans les programmes PEPR et PIA4, tels que les programmes autour de l'après 5G ou des réseaux du futur. Les auteurs remercient tout particulièrement l'ensemble des membres des laboratoires PhLAM et IEMN.

RÉFÉRENCES

[1] Image de la Physique INIST-CNRS (2007)

[2] T. Ozawa *et al.*, Rev. Mod. Phys. **91**, 15006 (2019)

[3] T. Nagatsuma *et al.*, Nature Photon. **10**, 371 (2016)

[4] www.mc2-technologies.com

[5] www.vmicro.fr

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

Gaël LATOUR[1,2]
[1] Université Paris-Saclay, Faculté des Sciences, 91190 Gif-sur-Yvette, France
[2] Laboratoire d'Optique et Biosciences, Ecole Polytechnique-IPParis, CNRS, Inserm, 91128 Palaiseau, France
***gael.latour@universite-paris-saclay.fr**

© M. Relid, Univ. Paris-Saclay

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.

Les 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.

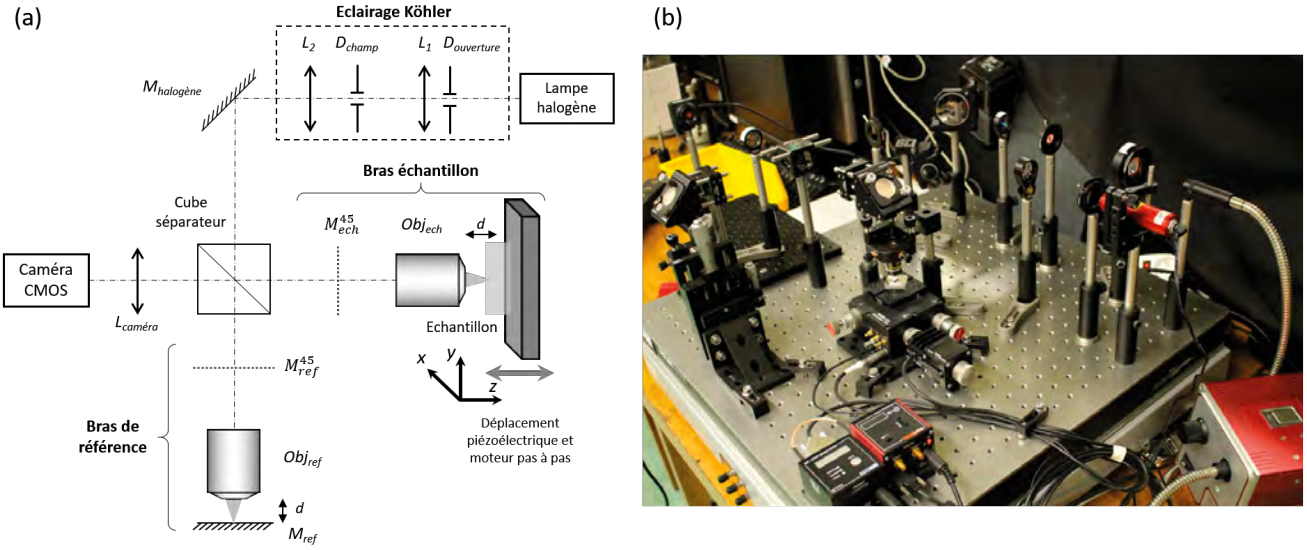


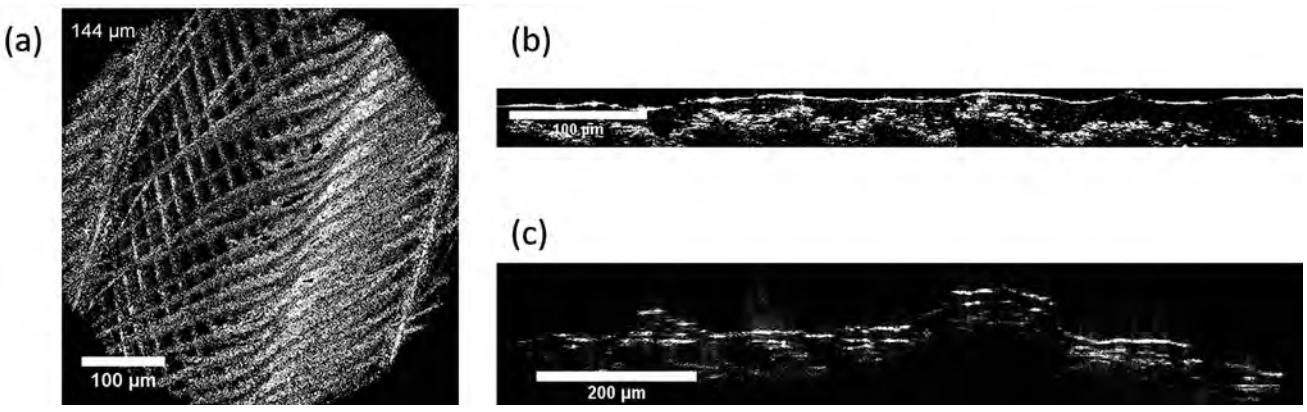
Figure 1. Montage expérimental réalisé par les étudiantes et les étudiants.
(a) Schéma optique du montage de tomographie par cohérence optique plein champ, tel que présenté dans l'énoncé du projet expérimental.
(b) Photo du montage final réalisé par les étudiants à l'issue du projet.
© M. Relid, Univ. Paris-Saclay.

Une technique d'imagerie en plein essor : la tomographie par cohérence optique

Inventée il y a une trentaine d'années [1], la tomographie par cohérence optique (OCT) permet d'accéder à une imagerie tridimensionnelle (3D) non invasive, non-destructive et sans marquage. Il s'agit d'une imagerie morphologique avec une résolution de l'ordre du micromètre pour des objets transparents ou faiblement diffusants [2]. Son application la plus connue est l'imagerie biomédicale en ophtalmologie. Elle permet en effet de réaliser le diagnostic de nombreuses pathologies rétiniennes et du segment antérieur de l'œil. Les applications s'étendent désormais à la dermatologie, la cardiologie ou l'oncologie ainsi qu'à l'analyse non destructive des objets anciens et patrimoniaux [2-3].

La tomographie par cohérence optique est basée sur l'utilisation d'un interféromètre de Michelson avec une source de lumière blanche. La faible cohérence temporelle d'une telle source assure une forte localisation des franges d'interférences. Le faible étalement des franges d'interférence permet d'atteindre pour ce système d'imagerie une résolution de l'ordre du micromètre selon l'axe dédié à la profondeur (voir encart sur le principe de la tomographie par cohérence optique). L'utilisation d'objectifs de microscope vise à améliorer la résolution latérale des images. L'objectif de ce projet en optique expérimentale pour les étudiants est

Figure 2. Images OCT obtenues par les étudiantes et les étudiants dans le cadre du projet expérimental.
(a) Image plein champ, vue en face (plan x-y), d'une plume.
(b) Coupe transverse (x-z) d'une couche de vernis (interface lisse sur la partie supérieure) sur du bois (structures diffusantes sur la partie inférieure de l'image).
(c) Coupe transverse d'une feuille avec l'observation de différentes couches de cellules végétales.



Inventée il y a une trentaine d'années [1], la tomographie par cohérence optique (OCT) permet d'accéder à une imagerie tridimensionnelle (3D) non invasive, non-destructive et sans marquage. Il s'agit d'une imagerie morphologique avec une résolution de l'ordre du micromètre pour des objets transparents ou faiblement diffusants [2].

d'assembler, aligner, régler et caractériser ce système d'imagerie de pointe en partant d'une table optique quasiment vide et en utilisant du matériel optique et opto-mécanique identique à celui présent dans les laboratoires de recherche ou en recherche et développement en entreprise. L'ensemble du matériel a été acquis pour cet enseignement afin d'avoir le meilleur compromis entre performance et coût. Le budget par montage est de l'ordre de 10 k€.

Le montage et l'alignement de ce dispositif d'imagerie permettent de mobiliser, d'évaluer et d'approfondir de nombreux aspects fondamentaux de l'optique enseignés à l'université[4] :

- L'optique géométrique : conception d'un microscope, réalisation et alignement d'un éclairage *Köhler*, imagerie par une caméra CMOS.
- L'optique ondulatoire : interféromètre de Michelson, cohérence temporelle, transformée de Fourier.
- L'imagerie numérique et la métrologie optique : champ de vue, temps d'exposition, échantillonnage, résolutions, sensibilité.

Construire son microscope tomographique

Le projet expérimental se déroule sur trois journées complètes, soit 24h pour les étudiants [5]. L'objectif de la première journée est de poser les bases liées à l'interférométrie et aux propriétés de cohérence temporelle avec une première approche classique des concepts liés à l'interférométrie en lumière blanche en utilisant un montage pédagogique de l'interféromètre de Michelson. Les étudiantes et les étudiants sont ainsi sensibilisés à la finesse des alignements et réglages attendus. Lors de la deuxième journée, les étudiants construisent eux même leur dispositif OCT en intégrant progressivement tous les éléments du montage sur une table optique. Les principales étapes de la réalisation de ce montage sont la réalisation et l'alignement d'un interféromètre de Michelson, la conception d'un éclairage de Köhler, la détermination du contact optique, l'intégration d'objectifs de microscope et la conjugaison du plan de l'objet étudié avec une caméra *via* une lentille de tube (figure 1a). Ces différentes étapes permettent d'identifier clairement le ● ● ●

Edmund 80 YEARS OF OPTICS

PUBLI-RÉDACTIONNEL

La tomographie par cohérence optique en un coup d'œil

Angelica Compatangelo[1], Rebecca Charboneau[2]

[1] Technical Marketing Manager

[2] Solutions Engineer, Edmund Optics

Qu'est-ce que c'est l'OCT ?

La tomographie par cohérence optique (OCT) est une technologie d'imagerie optique en temps réel, sans contact et à haute résolution, utilisée pour obtenir des images 2D ou 3D des échantillons.

Dans une configuration typique de l'OCT, une source de lumière à faible cohérence est dirigée et focalisé simultanément vers un échantillon et un miroir optique de référence à l'aide d'un séparateur de faisceau et des lentilles optiques. La lumière dispersée par chaque cible est recombiné par le séparateur de faisceau et elle produit une image d'interférence relayée vers un détecteur, produisant ainsi une image de l'échantillon.

Applications de l'OCT

Bien qu'elle soit également utile en métrologie dimensionnelle et en conservation des œuvres d'art, la principale application de l'OCT se situe dans le secteur médical. Le plus souvent, l'OCT est utilisée en ophtalmologie pour mieux diagnostiquer les maladies de l'œil, mais elle peut également être utilisée en cardiologie pour visualiser les plaques artérielles et ainsi prédire la probabilité d'une crise cardiaque.

Tendances en matière d'OCT

Ces dernières années, les efforts se sont concentrés sur l'amélioration de l'accessibilité de l'OCT, qui est généralement effectuée à l'aide de machines grandes et coûteuses, en mettant cette technologie à disposition sous forme de dispositifs de diagnostic sur le lieu de soins dans les pays en développement ainsi que dans les populations croissantes et vieillissantes des pays développés. Du coup, il convient de réfléchir au choix de l'optique : l'utilisation de composants standards, d'asphères ou de filtres en verre coloré peut être une stratégie efficace pour réduire les dimensions et le coût global du système.

Dans tous les cas, il est important de faire appel à un fabricant qui connaît bien la matière et qui est en mesure de conseiller et de soutenir à chaque étape du développement et de la production.

Edmund Optics est l'un des principaux fournisseurs et fabricants mondiaux de composants optiques standards et personnalisés, avec plus de 80 ans d'expérience dans le domaine de l'optique. ●

rôle de chacun des éléments dans ce montage complexe.

Une fois le montage finalisé (figure 1b), la troisième journée a pour vocation d'apprendre à régler les paramètres des éléments contrôlés informatiquement (déplacement *via* un moteur pas à pas et une platine piézo-électrique et prise d'images avec caméra). Il est alors possible de caractériser le système d'imagerie et de comparer ses performances à celles attendues théoriquement.

Les étudiantes et les étudiants profitent alors de leur système pour réaliser les images tomographiques d'objets de leur choix (voir figure 2) tout en se confrontant à la complexité des paramètres d'acquisition, en particulier dans le cas d'acquisition de données 3D.

Enseigner l'optique expérimentale dans l'enseignement supérieur

L'expérience de ce projet expérimental, les échanges au sein de l'équipe pédagogique et les retours des étudiants sur la base de questionnaires d'évaluation permettent d'identifier les forces de ce projet expérimental. Ce sont également des pistes de réflexion pour la conception de futurs enseignements en optique expérimentale. La construction d'un système d'imagerie de bout en bout permet aux étudiantes et étudiants de prendre conscience de leur capacité à construire un système d'imagerie complexe à partir de leurs connaissances et de leurs savoir-faire, au-delà de la simple étude ou vérification de lois physiques. L'aspect ludique d'un montage sur une table optique, avec les nombreux réglages possibles, leur plaît, malgré les difficultés. La plaisir est amplifié par la qualité du matériel qui permet une souplesse et une précision rarement atteintes dans les expériences pédagogiques. La limitation de leurs résultats est alors liée à leur habileté expérimentale et non au matériel disponible.

Enfin, la présence du numérique à travers l'acquisition et le traitement des images montre les différentes facettes des expériences optiques actuelles. Ce type de projet permet ainsi une autre approche de l'enseignement de l'optique avec la mobilisation de nombreux savoirs et les savoir-faire en optique expérimentale.

PRINCIPE DE LA TOMOGRAPHIE PAR COHÉRENCE OPTIQUE

Les systèmes de tomographie par cohérence optique (OCT) sont basés sur le principe de l'interférométrie en lumière blanche, c'est-à-dire en utilisant une source de lumière à faible cohérence temporelle [2]. Le montage optique est constitué d'un interféromètre de Michelson où l'extrémité de l'un des bras est mobile. En faisant varier la différence de marche, à proximité du contact optique, il est possible d'obtenir, en sortie de l'interféromètre une figure d'interférence. La largeur de l'interférogramme est liée aux propriétés de cohérence temporelle de la source. Moins la source est cohérente temporellement, c'est-à-dire qu'elle présente un large spectre, moins l'interférogramme sera étalé spatialement lors du déplacement de l'un des miroirs. Le principe de l'OCT est de tirer profit de ce faible étalement spatial. Ainsi, deux structures diffusantes ou deux interfaces successives dans la profondeur de l'échantillon vont donner lieu chacune à un interférogramme. S'il est possible de séparer ces deux interférogrammes, en recueillant l'enveloppe de ces deux interférogrammes, il est donc possible de résoudre la position spatiale de ces deux structures. La résolution axiale de l'OCT est donc directement liée à la cohérence temporelle de la source. En fonction des montages, les sources utilisées pour garantir cette faible cohérene temporelle peuvent être une lampe halogène, une diode électroluminescente (LED) ou un laser supercontinuum blanc.

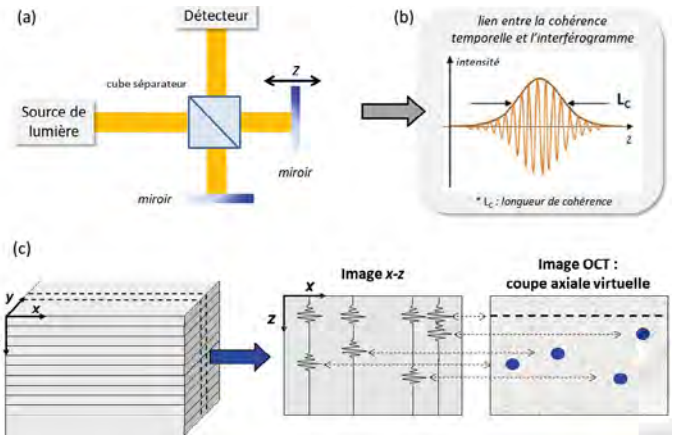


Figure. Principe de la tomographie par cohérence optique (OCT).
(a) Schéma de l'interféromètre de Michelson, avec un élément mobile à l'extrémité de l'un des bras pour varier la différence de marche entre les deux bras.
(b) Le déplacement de l'un des miroirs permet l'enregistrement de la figure d'interférences, également appelée interférogamme. La largeur de cet interférogramme est liée aux propriétés de cohérence temporelle de la source lumineuse.
(c) L'OCT dans le domaine temporel consiste à enregistrer un volume de données où chaque interférogramme est la signature d'une interface entre deux milieux ou d'une structure diffusante. En recueillant l'enveloppe de ces interférogrammes, il est possible de reconstruire l'image morphologique de l'échantillon étudié.

Le montage d'un système d'imagerie OCT permet de travailler sur de nombreux concepts et connaissances en optique qui sont étudiés tout au long d'un cursus universitaire. Du fait de leur part active dans ce projet, les étudiants acquièrent complètement les connaissances de base liées à cette technique d'imagerie. C'est également l'occasion d'illustrer que l'optique est un tout, malgré les découpages et les progressions conçues dans l'enseignement supérieur.

Conclusion

Le montage d'un système d'imagerie OCT permet de travailler sur de nombreux concepts et connaissances en optique qui sont étudiés tout au long d'un cursus universitaire. Du fait de leur part active dans ce projet, les étudiants acquièrent complètement les connaissances de base liées à cette technique d'imagerie. C'est également l'occasion d'illustrer que l'optique est un tout, malgré les découpages et les progressions conçues dans l'enseignement supérieur. De plus, ce projet s'inscrit sur une durée qui permet de faire entrevoir aux étudiants ce que peut être le travail expérimental en optique, que ce soit au sein d'un laboratoire académique ou dans l'industrie. Le retour des étudiants, documenté *via* des questionnaires d'évaluation, montre leur satisfaction à travers la fierté de construire entièrement un système d'imagerie malgré les difficultés rencontrées, le plaisir d'utiliser du matériel de qualité, robuste et précis et la satisfaction d'obtenir des images de qualité. Ils se sentent ainsi réellement acteur de ce projet expérimental.

Remerciements

Ce projet expérimental a été conçu par Gaël Latour (*Université Paris-Saclay*), la conception des supports pédagogiques et l'évolution de ce projet ont été réalisés au sein d'une équipe d'enseignants-chercheurs de l'*Université Paris-Saclay* (Marie Godard, Vincent Guillet, Marion Jacquey, Gaël Latour). Cet enseignement est proposé depuis 2016 aux étudiants de M1 Physique Fondamentale et du M2 Ingénierie Optique de l'Université Paris-Saclay.

Cet enseignement a été financé par l'Université Paris-Saclay, le Labex PALM et l'entreprise Thorlabs. ●

RÉFÉRENCES

[1] D. Huang *et al.*, Science **254**, 1178 (1991)

[2] Dossier spécial OCT, Photoniques **95** (2019)

[3] G. Latour, L. Robinet, « La microscopie optique tridimensionnelle, de l'imagerie biomédicale à la caractérisation des objets du patrimoine, Instrumentation portable. Quels enjeux pour l'archéométrie ?», ed. Archives contemporaines (2019), https://eac.ac/articles/2469

[4] K. Pieper *et al.*, Am. J. Phys. **88**, 1132 (2020)

[5] Film de présentation du projet expérimental, réalisation M. Relid, https://www.canal-u.tv/chaines/faculte-orsay/lumiere-sur-un-enseignement-innovant-construire-son-microscope-tomographique

CENTENAIRE DE LA DÉCOUVERTE DE L'EFFET BRILLOUIN

Jean-Charles BEUGNOT[1]*, Philippe DJEMIA[2], Jérémie MARGUERITAT[3]

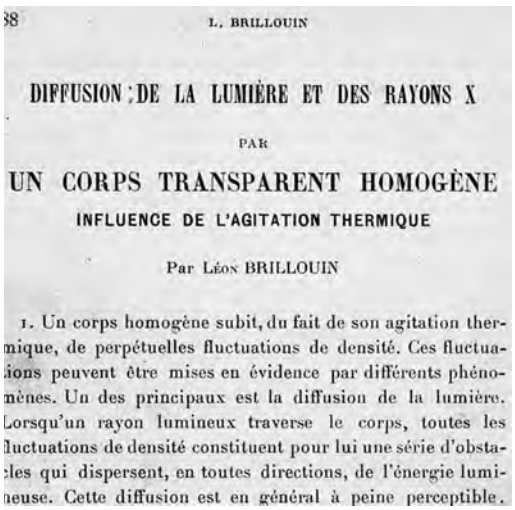
[1] Institut FEMTO-ST, Univ. Bourgogne Franche-Comté, UMR 6174, Besançon, France

[2] LSPM, CNRS-3407, Université Sorbonne Paris Nord, Villetaneuse, France

[3] Université de Lyon, Université Claude Bernard Lyon1, CNRS, Institut Lumière Matière (ILM) UMR 5306, Villeurbanne, France

***jc.beugnot@femto-st.fr**

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.



88 L. BRILLOUIN

DIFFUSION DE LA LUMIÈRE ET DES RAYONS X

PAR

UN CORPS TRANSPARENT HOMOGÈNE

INFLUENCE DE L'AGITATION THERMIQUE

Par Léon BRILLOUIN

1. Un corps homogène subit, du fait de son agitation thermique, de perpétuelles fluctuations de densité. Ces fluctuations peuvent être mises en évidence par différents phénomènes. Un des principaux est la diffusion de la lumière. Lorsqu'un rayon lumineux traverse le corps, toutes les fluctuations de densité constituent pour lui une série d'obstacles qui dispersent, en toutes directions, de l'énergie lumineuse. Cette diffusion est en général à peine perceptible.

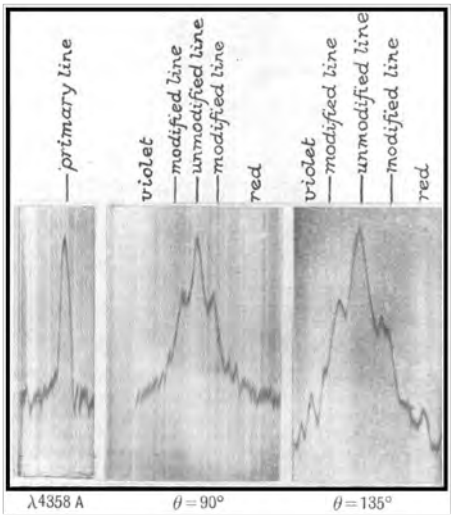


Figure 1 : À gauche, copie de la première page de l'article publié par Léon Brillouin en 1922 [1]. À droite, vérification expérimentale de la diffusion Brillouin dans le benzène par E. Gross en 1930. Source [2], avec autorisation ©Nature.

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

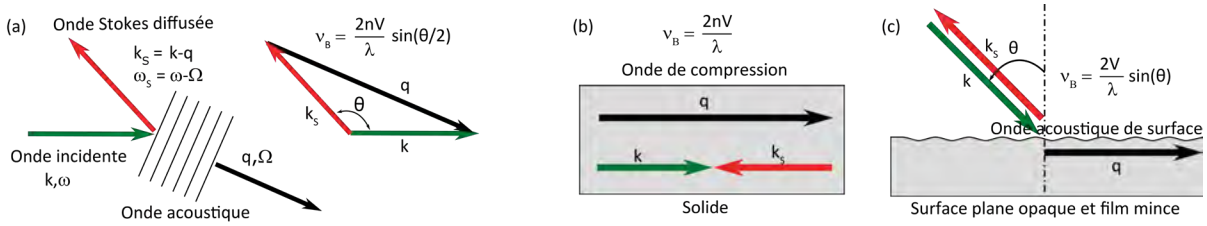
Deux ans après la publication de sa thèse, Léon Brillouin publie son travail sur la diffusion de la lumière par des ondes acoustiques d'origine thermique [1]. Ce travail théorique dont on trouve des traces dans les notes de Brillouin dès 1914 [2], avait pour objectif initial de compléter la théorie d'Einstein 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

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 ($\mathbf{k}$, $\mathbf{k_S}$) 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^{-1} à 5cm^{-1}). 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).



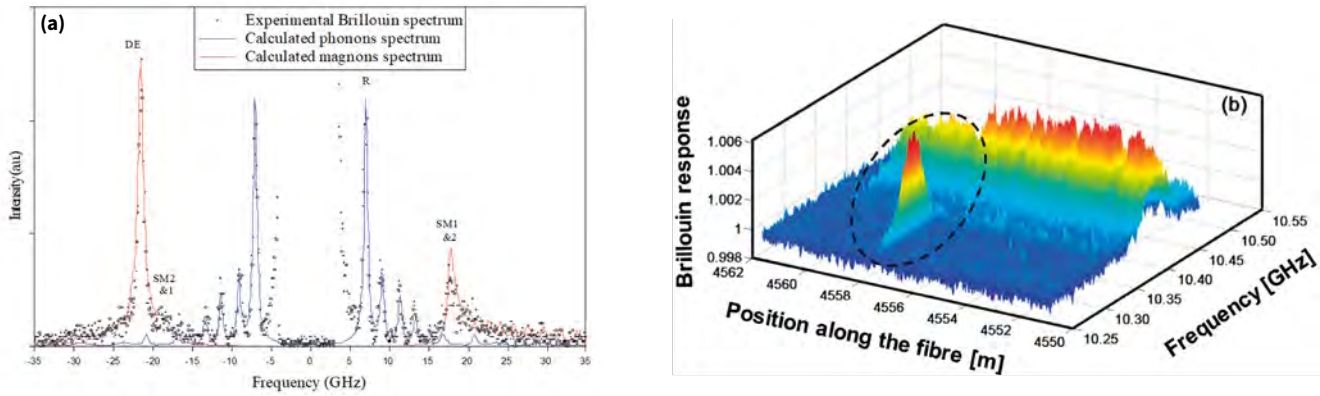


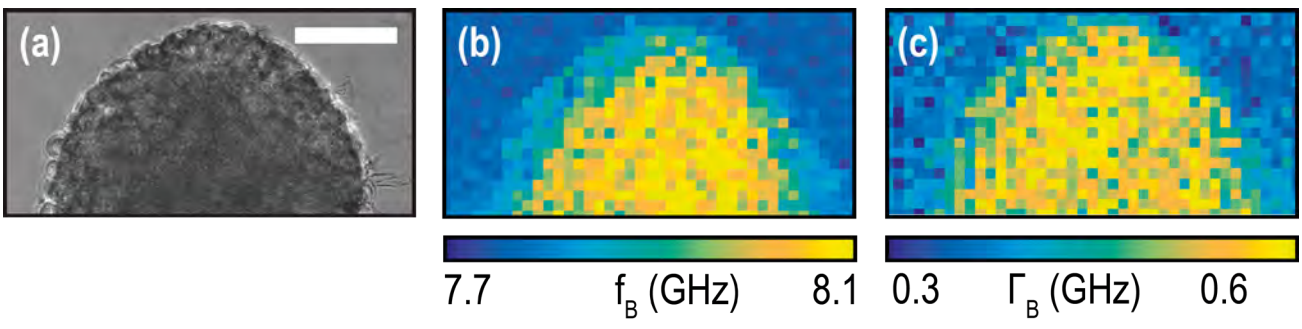
Figure 2 : (a) Rétrodiffusion Brillouin par des ondes acoustiques (R:Rayleigh) et de spin (DE : Damon-Eshbach) de surface dans un alliage ferromagnétique $Fe_{80}Ni_{20}$ d'une épaisseur de 323 nm. (b) Mesures distribuées de la rétrodiffusion Brillouin le long d'une fibre optique, le spectre entouré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

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 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 .*



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).

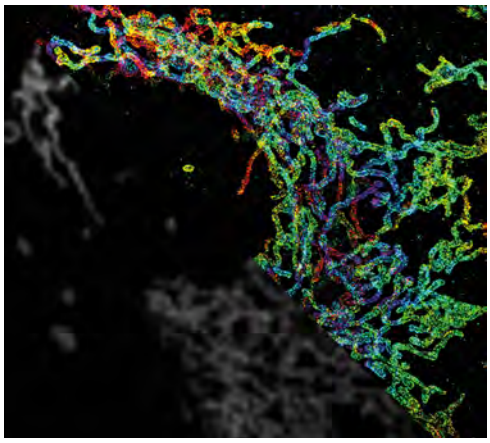
LOCALISATION NANOMÉTRIQUE DE MOLÉCULES UNIQUES PAR MODULATION DU SIGNAL DE FLUORESCENCE

Abigail ILLAND[1], Pierre JOUCHET[1], Emmanuel FORT[2], Sandrine LÉVÊQUE-FORT[1]

[1]Institut des sciences Moléculaires d'Orsay, Université Paris Saclay, CNRS, 91405 Orsay

[2]Institut Langevin, ESPCI, Université PSL, 75005 Paris

***sandrine.leveque-fort@universite-paris-saclay.fr**



La microscopie de localisation de molécules individuelles permet de dépasser la limite de diffraction, révélant ainsi l'organisation cellulaire à l'échelle nanométrique. Cette méthode reposant sur l'analyse spatiale du signal émis par les molécules, reste souvent limitée à l'observation d'objets biologiques à de faibles profondeurs, ou très peu aberrants. Nous montrons ici que l'introduction d'un paramètre temporel dans le processus de localisation *via* l'introduction d'une excitation modulée permet d'adresser ces limitations.

https://doi.org/10.1051/photon/202211430

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

La microscopie à localisation de molécules uniques (SMLM) est une méthode d'imagerie de fluorescence qui contourne la limite de diffraction et permet ainsi d'atteindre des résolutions spatiales de l'ordre de 10-50 nm, contre plusieurs centaines de nanomètres pour les méthodes d'imagerie optiques classiques [1,2]. Cette approche d'imagerie de fluorescence repose sur la détection et la localisation de molécules uniques dans le volume focal du microscope et qui émettent de manière aléatoire au cours du temps. En effet même si l'image d'une molécule fluorescente isolée dans l'échantillon est convoluée avec la réponse percusionnelle du système optique et en particulier de l'objectif, et correspond donc à une tache limitée par la diffraction sur la caméra, également appelée PSF (*Point Spread Function*), il est possible de retrouver le barycentre de la tache confondu avec la position de la molécule en appliquant un modèle d'ajustement de cette PSF (typiquement un modèle gaussien). La position transverse (x,y) de l'émetteur fluorescent peut être extraite avec une précision bien en deçà de la limite de diffraction et qui dépend principalement du nombre de photons (N) émis par la molécule $\sigma_{x,y} \sim \sigma_{PSF} / \sqrt{N}$ mais également de la taille de la PSF. On cherchera ainsi à utiliser des molécules fluorescentes émettant un nombre important de photons, et des objectifs à très

grande ouverture numérique (> 1.3) afin de bénéficier d'une taille de PSF réduite et d'une collection de fluorescence efficace. Ce principe de localisation permettant de suivre le déplacement de molécules individuelles dès les années 1980, a dû attendre l'apparition de nouvelles stratégies photophysiques (PALM, STORM, DNA-PAINT) pour être appliqué à l'observation de structures biologiques marquées avec un grand nombre de molécules fluorescentes, et ainsi les contraindre à ne pas émettre simultanément mais de manière aléatoire afin de permettre la localisation de chacune d'entre elles de façon décalée dans le temps et l'espace. Ainsi, dans chaque image acquise, seule une sous-population de molécules individuelles est détectée et localisée, ce qui impose typiquement d'acquérir entre 10000 à 40000 images afin de sonder l'ensemble de la structure et de reconstruire en temps réel ou en post-traitement l'image super-résolue finale (cf Fig. 1 a-b). Ce processus de localisation ne donnant accès qu'à une information spatiale transverse (x,y), des stratégies complémentaires doivent être mises en place afin de localiser la position des molécules suivant l'axe optique (z). Les méthodes principalement utilisées reposent sur une mise en forme de la PSF afin de briser sa symétrie axiale comme l'introduction d'astigmatisme (*cf.* Fig.1c,d-g). Simple à mettre en œuvre, cette approche nécessite une calibration axiale rigoureuse pour associer les déformations induites à des positions axiales qui s'estompent très vite lors d'observation en profondeur. D'autres familles de mise en forme de PSF ont été développées afin d'étendre les performances aussi bien en termes de profondeur d'observation que de précision axiale qui tend à varier dans le volume d'observation (*cf.* Fig.1g) [3]. L'utilisation de la lumière supercritique peut également apporter intrinsèquement cette information axiale mais est limitée en profondeur d'observation à 500-600 nm et s'adapte particulièrement bien au suivi des structures d'adhésion cellulaires [4]. Lors du processus de localisation aussi bien transverse qu'axiale, toute déformation de la PSF induite par exemple par un simple defocus ou des aberrations plus complexes liées à l'échantillon affecte la précision de localisation. L'analyse de la PSF basée uniquement sur des paramètres spatiaux impacte ainsi aussi bien la localisation 2D que 3D mais aussi la capacité à observer en profondeur les échantillons. Nous avons donc proposé l'insertion d'un paramètre temporel afin d'extraire l'information de localisation avec une précision accrue et uniforme dans la profondeur d'observation. En particulier nous nous sommes inspirés d'une méthode utilisant des propriétés spatiales de l'illumination pour réaliser le suivi du signal de diffusion d'une bille de polystyrène dans un motif d'excitation structuré crée par des interférences déplacées temporellement sur l'échantillon [5]. L'excitation modulée temporellement induit une diffusion également modulée dont la phase traduit la position de la molécule. Cependant ce dispositif destiné à observer un seul objet dans le champ d'observation permettait l'utilisation d'une photodiode et d'une détection synchrone, afin d'extraire la phase du signal modulé de l'objet et d'en extraire l'évolution de sa position dans le champ d'observation. Nous avons donc récemment revisité ce concept pour l'adapter à l'observation de structures biologiques *via* la localisation de molécules fluorescentes uniques, ce qui impose le développement d'une détection synchrone compatible avec l'acquisition d'un champ large *via* une caméra, et impliquant un nombre de photons de fluorescence limité associé à des évènements d'émission stochastique au cours de l'acquisition. Cette nouvelle approche de microscopie, appelée ModLoc (*Modulated Localization*), permet d'extraire sur un large champ (typiquement de 50 µmx50 µm) la position des molécules avec une précision de localisation accrue d'un facteur 2.4 suivant la direction d'application de la modulation [6].

En pratique, l'excitation de l'échantillon uniforme est remplacée par un motif d'excitation sinusoïdal balayé dans une direction (*cf.* Fig.1h). Par exemple dans le cas de la direction transversale • • •

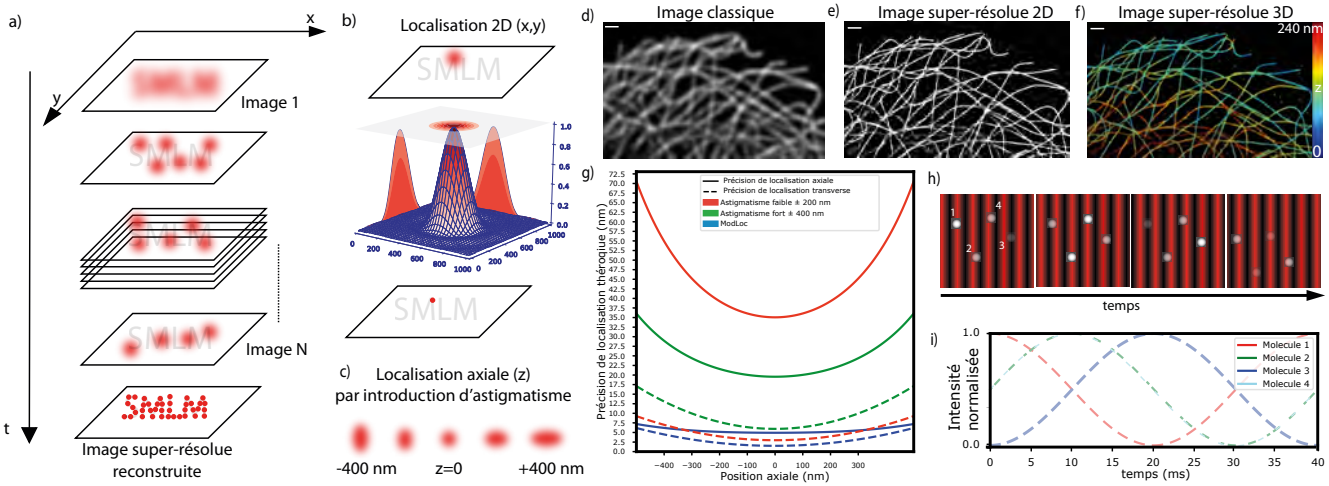


Figure 1. a) Principe de localisation de molécules uniques, où seulement une sous-population est observée afin de permettre la localisation successive dans un grand nombre d'images.
b) La position transverse (x,y) de la molécule est obtenue par un ajustement typiquement *via* un modèle gaussien.
c) La position axiale est obtenue par une méthode complémentaire comme l'introduction d'un astigmatisme. d,e,f) Images d'un réseau de microtubules dans une cellule respectivement en microscopie classique, microscopie super-résolue 2D (STORM), et microscopie super-résolue 3D où la fausse couleur code le z obtenu par astigmatisme.
g) Précision avec laquelle les molécules peuvent être positionnées aussi bien transversalement qu'axialement pour différentes valeurs d'astigmatismes, et qui montre leurs variations dans la profondeur d'observation.
À contrario, la technique développée (ModLoc) permet de bénéficier d'une précision uniforme. h) dans la technique ModLoc l'introduction d'une excitation structurée déplacée sur l'échantillon permet d'induire i) un signal de fluorescence modulé dont la phase sera extraite par une mesure de typiquement 4 valeurs.

x avec une fréquence de modulation temporelle Ω et un pas spatial Λ, elle s'écrit sous la forme :

$$I(x,t) = I_0\left(1 + m\cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda}x + \Omega t\right)\right) \quad (1)$$

Avec I_0 étant l'intensité lumineuse moyenne sur l'ensemble du champ et m étant le contraste du motif d'illumination. Dans le régime d'excitation linéaire, le signal de fluorescence d'une molécule est proportionnel à l'intensité lumineuse reçue et induit un flux de photons N(x,t) pour une molécule éclairée par le champ d'excitation de l'équation (1) placée à la position x donné par

$$N(x,t) = N_0\left(1 + m\cos\left(\Phi(x) + \Omega t\right)\right) \quad (2)$$

avec $\Phi(x) = \frac{2\pi}{\Lambda}x$ et où N_0 est le flux moyen de photons détectés associé à une intensité d'illumination I_0. Le signal modulé dans le temps porte alors une information sur la position de la molécule dans sa phase $\Phi(x)$. La Figure 1h et 1i schématisent la variation temporelle de l'excitation de molécules fluorescentes situées dans un champ d'excitation sinusoïdal et les signaux de fluorescence induits. La démodulation du signal de fluorescence permettant de remonter à la phase de chaque molécule peut être obtenue en synchronisant 4 positions des franges sur l'échantillon avec l'acquisition de 4 points d'échantillonnage temporel du signal d'intensité de fluorescence modulée sur la caméra (cf Fig.2 a).

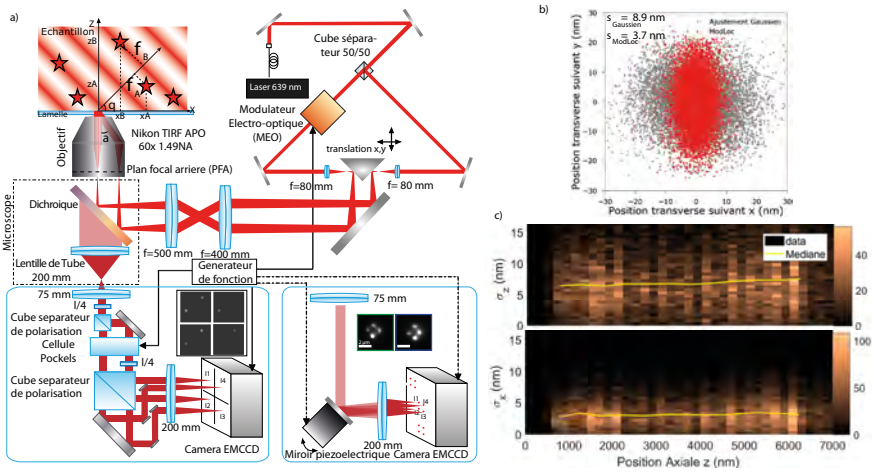
Dans la figure 1i-h, on peut voir que les molécules situées à différentes positions dans le champ ont des phases différentes, mais que certaines molécules (2 et 4) peuvent présenter des phases identiques du fait de la périodicité du signal de modulation. Afin d'extraire la position finale dans le champ d'observation, on associe une analyse gaussienne sur l'image permettant d'identifier dans quelle frange se situe la molécule, à l'information de phase localisant précisément la molécule dans la frange. Les bornes de Cramer Rao (CRLB), qui donnent accès à la précision théorique de localisation accessible pour cette méthode dans le cas d'une démodulation en 4 points, sans signal de bruit de fond et pour un contraste d'excitation maximal, s'écrit :

$$\Delta_x = \frac{\sigma_{PSF}}{\sqrt{N\left(1+\frac{4\pi^2\sigma_{PSF}^2}{\Lambda^2}\right)}} \quad (3)$$

Où on voit que le pas du motif d'excitation impacte la précision de localisation. Le dispositif expérimental (Fig. 2-a) est basé sur une excitation sinusoïdale créée en faisant interférer deux faisceaux dans l'échantillon biologique. Le modulateur électro-optique permet le déplacement des interférences sur l'échantillon typiquement à 1.2 kHz. Les caractéristiques temporelles du signal de fluorescence imposent des contraintes spécifiques aux stratégies de démodulation, car les molécules ne restent actives que sur des

temps très courts (typiquement autour de 15-20 ms) et apparaissent/disparaissent de façon aléatoire au cours de l'acquisition. Ceci ne permet pas l'obtention des 4 valeurs d'intensité par une acquisition séquentielle d'images qui serait trop lente avec les caméras actuellement utilisées et environ 30 % des événements ne pourraient être analysés. Nous avons ainsi proposé une nouvelle solution pour effectuer la démodulation à haute fréquence indépendamment de la fréquence d'acquisition limitée de la caméra. En introduisant un élément optique tel qu'un miroir sur un support piézo-électrique ou galvanométrique ou une cellule pockels devant la caméra, il est possible d'échantillonner temporellement le signal de fluorescence en distribuant spatialement 4 échantillons de l'intensité modulée à l'intérieur d'une même image acquise par la caméra. Ainsi le signal de la même molécule fluorescente est divisé en 4 PSFs ayant 4 intensités différentes selon sa position initiale dans le motif d'excitation. Ces 4 PSF peuvent être reparties soit dans 4 cadrans distincts soit en les positionnant suivant une forme choisie (*cf.* Fig.2 a). Les fréquences de modulation/démodulation peuvent ainsi atteindre typiquement le kHz, ce qui permet d'acquérir au minimum une cinquantaine de cycles de modulation par image caméra enregistrée, et ainsi pouvoir analyser l'ensemble des émetteurs fluorescents uniques quelle que soit leur vitesse de clignotement. ModLoc peut aussi bien améliorer la résolution transverse [6] qu'axiale [7]. On voit ainsi sur un exemple simple où la modulation a été appliquée suivant une seule direction (x), que la précision de localisation obtenue avec ModLoc est de $\sigma_{ModLoc} = 3.7\ nm$ comparée à l'axe y, qui a été observée en localisation classique avec ajustement du signal par une gaussienne $\sigma_{Gauss} = 8.9\ nm$ soit une

Figure 2. a) Exemple de dispositif expérimental pour une application des interférences suivant la direction XZ. Le laser est séparé en 2 voies afin de créer directement les interférences dans l'échantillon. Le modulateur électro-optique permet de les déplacer au kHz. Différents dispositifs de démodulation ont été développés pour obtenir les 4 valeurs d'intensité de fluorescence dans une même image de la caméra, soit ***via*** une cellule Pockels, soit par un miroir piézo-électrique. b) Exemple de gain en précision de localisation de 2.4, en appliquant ModLoc suivant une direction transverse (x, data en rouge) qui permet de directement comparer par rapport à la localisation gaussienne standard (y, data en gris). c) Mesure de précision réalisée sur des molécules uniques (AF647) à l'intérieur de cellules et qui confirme l'uniformité de précision attendue avec ModLoc aussi bien axiale (σ_z) que latérale (σ_x) sur plusieurs microns. (adaptée avec autorisation de [6-7])



flexible.
Laser Engine for Biophotonics and Neuroscience
Up to 7 wavelengths
405 nm - 785 nm
iChrome FLE
• 2-fiber switch / splitter
• All diode design for long lifetime
• COOL^{AC} automatic alignment
Plug & play installation!
learn more...
Distributed by OPTON LASER INTERNATIONAL
TOPTICA
www.optonlaser.com

amélioration comme attendue d'un facteur 2.4 (cf Fig. 2b). Lors de l'application pour améliorer la résolution axiale, nous avons choisi d'appliquer des interférences tiltées suivant l'axe xz, en décalant un des 2 faisceaux dans le plan focal arrière de l'objectif, ce qui permet de conserver un seul objectif. L'information de position en z est ainsi obtenue en combinant l'information de position latérale x, et l'information de phase dans le réseau d'interférence (θ étant l'angle de tilt des interférences):

$$z = \frac{\Lambda\phi}{2\pi\sin(\theta)} - \frac{x}{\tan(\theta)} \qquad (4)$$

Ce dispositif nous permet d'obtenir des précisions de typiquement 6.8 nm axialement et 3.4 nm latéralement. De plus nous avons pu montrer que ces précisions restent uniformes aussi bien à l'intérieur de la profondeur d'observation mais également pour différentes positions dans l'échantillon jusqu' à 7 µm (*cf.* Fig.2c). La figure 3 présente des observations en (d)-STORM de différentes protéines à l'intérieur des cellules et immunomarquées par un anticorps primaire et un anticorps secondaire (associé à un fluorophore émettant un grand nombre de photons (Alexa 647)). La figure 3a permet ainsi d'identifier l'organisation de la protéines TOM20 marquant la membrane des mitochondries dans une cellule COS7 isolée. Nous avons pu observer également des cellules à l'intérieur de matrice de collagène mimant des tumeurs, et malgré la forte diffusion (fig.3c) le réseau de microtubules formant une partie du cytosquelette cellulaire peut être résolu pour une cellule située à plus de 30 µm en profondeur (Fig. 3b,d).

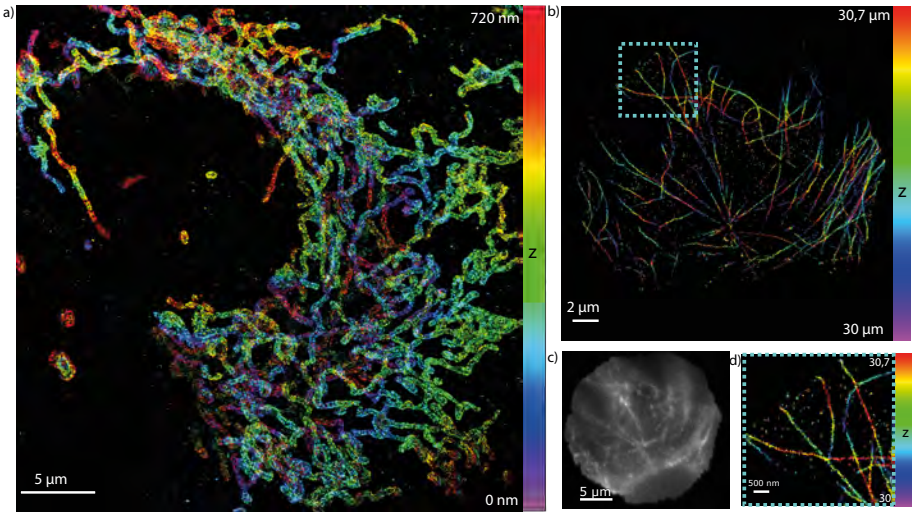


Figure 3.
a) Image ModLoc des membranes de mitochondries de cellules COS7 (protéine marquée TOM20-Alexa 647), avec le z représenté en fausse couleur, pour une cellule à proximité de l'interface de la lamelle de microscope.
b) Image ModLoc du réseau de microtubule dans une cellule COS7 placée à 30 µm en profondeur dans une matrice de collagène diffusante.
c) Image de fluorescence classique de la même zone,
d) zoom sur la région d'intérêt encadrée en b). (b-d adaptées avec autorisation de [7]).

CONCLUSION

Cette capacité d'observation à grande profondeur et avec une résolution uniforme ouvre de nouveaux champs d'application à la microscopie de localisation de molécules uniques, pour l'observation d'échantillons complexes ou en volume. Cette technique a jusqu'à présent été appliquée suivant soit des directions transverses (x,y) soit une direction axiale, mais la combinaison de différentes modulations dans les 3 directions est également possible. Nous travaillons actuellement à repousser encore les limites de ModLoc, afin notamment d'améliorer encore la résolution. En effet jusqu'à présent le pas de l'interfrange d'excitation a été choisi pour s'ajuster à la profondeur d'observation de l'objectif, un pas plus faible permettrait d'augmenter les performances mais nécessiterait de mettre en place un dépliement de l'information. Ce concept d'introduction d'une modulation temporelle pour révéler une information à l'échelle de la molécule unique est générique et pourrait s'appliquer à d'autres paramètres tels que par exemple l'orientation de la molécule. ●

RÉFÉRENCES

[1] R.M.Dickson, A.B. Cubitt, R.Y. Tsien, W.E. Moerner, Nature **388**, 355-358 (1997)

[2] E. Betzig, G. H. Patterson, R. Sougrat *et al.*, Science 313 (5793), 1642-1645 (2006)

[3] A. von Diezmann, Y. Shechtman, W.E. Moerner, Chem. Rev. **117**, 7244(2017).

[4] N. Bourg, C. Mayet, G. Dupuis *et al.*, Nat. Photonics **9**, 587–593 (2015)

[5] L. Busoni, A. Dornier, J.-L. Viovy, J. Prost, G. Cappello, J. Appl. Phys. **98**, 064302 (2005).

[6] P. Jouchet, C. Poüs, E. Fort, S. Lévêque-Fort, Philos. Trans. R. Soc., A **380**, 20200299 (2022).

[7] P. Jouchet, C. Cabriel, N. Bourg *et al.*, Fort E., et S. Lévêque-Fort, Nat. Photonics **15**, 297–304 (2021)

OPTON LASER INTERNATIONAL | telight

SUPER-RÉSOLUTION ET GÉOMÉTRIE CONFOCALE : ENTRE RÉSOLUTION ET ACCESSIBILITÉ

La microscopie confocale est centrale en imagerie biologique en raison de son efficacité, de sa facilité d'utilisation et de sa versatilité. Elle permet d'obtenir rapidement des images avec une bonne résolution latérale (200nm environ) et en profondeur (0.2 - 0.5mm). Les microscopes confocaux sont simples à installer et assez abordables. Un utilisateur peut y être formé en quelques heures, et ils sont capables de travailler avec une grande variété d'échantillons et de fluorophores.

La résolution spatiale du microscope confocal est limitée par la diffraction lumineuse. Les techniques dites de « Super-résolution » permettent de repousser cette limite. Par exemple, la microscopie d'illumination structurée (SIM) utilise un éclairage structuré présentant des « zébrures » très fines, permettant d'attendre une résolution d'environ 120 nm (jusqu'à 60nm sur les modèles les plus récents). Cette technique nécessite cependant des dispositifs d'illumination assez complexes et des échantillons très fins, elle a du mal à faire des images en profondeur.

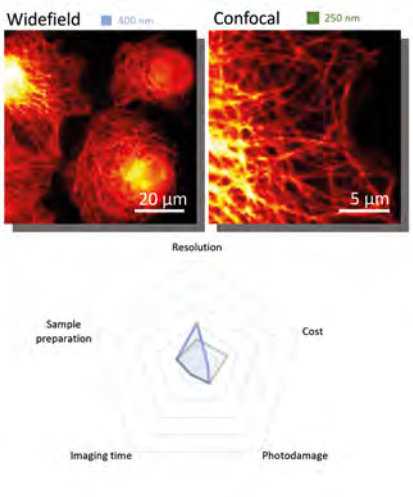
En pratique, la microscopie super-résolue est souvent réservée aux plateformes d'imagerie, qui peuvent justifier l'achat de ces machines et y former leurs utilisateurs. Ces systèmes ne remplacent pas les microscopes confocaux, mais les complètent. Beaucoup de questions biologiques ne nécessitant pas la super-résolution, le confocal reste la première étape de la démarche d'imagerie. La super-résolution vient ensuite comme complément. Ainsi, il arrive souvent que l'utilisateur ne veuille pas d'une meilleure résolution spatiale au prix d'une complexité supplémentaire. Plutôt que d'une imagerie super-résolue, on veut une imagerie confocale super-résolue, présentant la même facilité et flexibilité que le confocal, mais avec une meilleure résolution. L'exemple le plus connu d'une telle technique est l'AiryScan (Zeiss), qui atteint une résolution de 140nm.

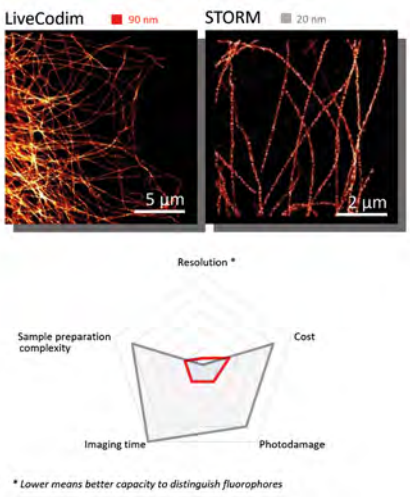
L'illumination structurée s'accorde très bien avec la conception confocale. C'est ce que fait la microscopie de diffraction conique - le LiveCodim, développée par l'entreprise Franco-Tchèque Bioaxial, (Telight). Un système de mise en forme de faisceau crée à partir d'un laser classique des faisceaux de lumière contrôlée. Ces faisceaux ont une forme en « demi-lune » qui présente une extinction plus fine qu'une figure d'Airy classique, permettant d'extraire des fréquences spatiales supplémentaires des échantillons. On obtient une image mieux résolue d'une façon analogue au SIM, mais d'une manière localisée, atteignant des résolutions latérales entre 90nm et 120 nm.

Le LiveCodim combine donc les avantages du confocal et de l'illumination structurée : il peut faire des acquisitions en trois dimensions (« Z-stack ») ou des images de tissus ou cellules en mouvement sans déformations. Le LiveCodim s'adapte à toutes sortes d'échantillons, ne nécessitant aucune préparation ou fluorophore particulier. Il fonctionne avec une large variété d'objectifs et de microscopes. Enfin, la technologie est fondamentalement achromatique, ce qui lui permet de travailler avec n'importe quelle longueur d'onde, de 405 à 1200 nm. La réduction du budget photonique minimise les dommages causés aux échantillons. Cela est particulièrement utile lors de l'imagerie répétée de cellules ou de tissus vivants. Le système est un module connectable par un port Caméra sur n'importe quel microscope optique existant, permettant une conversion rapide d'un microscope à champ plein vers un système super-résolu.

Ce système s'insère ainsi pleinement dans la lignée des concepts à géométrie confocale qui mettent en avant la rapidité et la simplicité d'utilisation, améliorant la qualité d'image sans contraintes par rapport aux confocaux. Bien que leur résolution soit inférieure à d'autres systèmes plus coûteux et plus complexes, c'est l'accessibilité de ces « super-confocaux » qui fait leur essor actuel et leur importance pour le futur de l'imagerie optique.

Contact Bioaxial, Part of Telight & Telight en France :
Sylvain Martin, 06 72 34 61 79
sylvain.martin@optonlaser.com

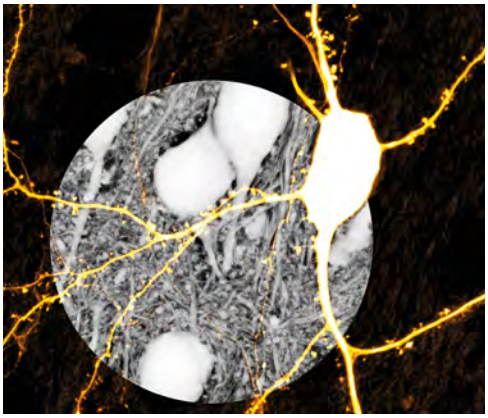




PLUS VIVE, PLUS NETTE : LA MICROSCOPIE STED DU CERVEAU

Misa ARIZONO[1] and U. Valentin NÄGERL [1,*]

[1] Institut Interdisciplinaire de Neurosciences, Université de Bordeaux, CNRS UMR 5297, Centre Broca Nouvelle-Aquitaine, 146 rue Léo Saignat, 33076 Bordeaux, France
*valentin.nagerl@u-bordeaux.fr



La microscopie à super-résolution (SRM) désigne une nouvelle catégorie de techniques de microscopie optique qui permettent de surmonter la barrière de diffraction classique,- barrière qui a rendu difficile l'observation des structures et des activités qui constituent la base de la vie cellulaire biologique. La microscopie STED, qui est l'une des techniques SRM, a attiré l'attention des neurobiologistes, car elle permet de révéler la nanostructure des cellules cérébrales non seulement dans une boîte de Pétri, mais aussi à l'intérieur du tissu cérébral réel, voire dans le cerveau intact in vivo.

https://doi.org/10.1051/photon/202211436

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

La microscopie à fluorescence conventionnelle ne parvient jamais à produire des images nettes des caractéristiques morphologiques et moléculaires lorsque celles-ci sont inférieures à 250 nm, ce qui est le cas pour de nombreuses structures cellulaires clés. Ce problème est particulièrement contrariant dans le domaine des neurosciences, car la morphologie des cellules cérébrales telles que les neurones et les cellules gliales est extrêmement élaborée et miniaturisée de par sa conception. Cependant, la microscopie STED, qui est une technique récente d'imagerie de fluorescence à super-résolution, offre une résolution spatiale suffisante pour ces structures nanométriques. De plus, elle peut être réalisée sur des cellules vivantes à l'intérieur de tissus cérébraux intacts ou d'organoïdes 3D, et être combinée à d'autres techniques de cellules vivantes, telles que l'imagerie du Ca^{2+} et l'électrophysiologie, ce qui permet d'étudier les liens entre la nanostructure et la physiologie.

LA LIMITE CLASSIQUE DE LA RÉSOLUTION SPATIALE

Pour comprendre comment fonctionne la microscopie optique à super-résolution, il faut d'abord rappeler la notion fondamentale de résolution spatiale et pourquoi les scientifiques ont cru pendant si longtemps qu'elle était limitée. En raison de sa nature ondulatoire, la lumière ne peut être focalisée en un point arbitrairement petit, quelles que soient la collimation et la cohérence. L'image d'une seule protéine fluorescente, comme la GFP (protéine fluorescente verte), sera toujours une tache floue plus de cent fois plus grande que la molécule elle-même. Ceci est dû au fait que les photons sont « diffractés » par l'optique d'un microscope, et la largeur de cette tache floue (Δr) est appelée « limite de diffraction de la microscopie optique ». Cette limite de diffraction est bien approchée par l'équation simple :

$$\Delta r = \frac{\lambda}{2NA} \qquad (1)$$

également connue sous le nom de « formule d'Abbe », où λ désigne la longueur d'onde de la lumière et NA l'ouverture numérique, qui est définie comme $n\sin\alpha$ et désigne la capacité de l'objectif à capturer la lumière se déplaçant sur l'angle solide (α) depuis l'échantillon à travers un milieu d'immersion avec un indice de réfraction

de n. Pour imager par exemple un échantillon marqué GFP (λ_{em} = 510 nm) avec un objectif à fort indice de réfraction (NA = 1,0), Δr est d'environ 250 nm. Pour ces raisons, il était impossible, jusqu'à récemment, de résoudre des éléments plus petits que la moitié environ de la longueur d'onde des photons utilisés dans un microscope, ce qui représentait un obstacle insurmontable et une source de frustration permanente pour les biologistes cellulaires et les neuroscientifiques.

Heureusement, plusieurs concepts fructueux ont été développés - créant ainsi le domaine de la SRM *(Super-Resolution Microscopy)* – qui surmontent ce problème de longue date et permettent d'atteindre une résolution bien au-delà de la zone de diffraction. Au lieu d'essayer de pousser les paramètres NA ou λ, ils introduisent de nouveaux termes dans les formules de résolution qui s'échelonnent en fonction des intensités lumineuses impliquées dans la formation de l'image.

LA MICROSCOPIE STED

Le premier principe viable pour dépasser la limite de diffraction a été la microscopie STED (*STimulated Emission Depletion*), qui repose sur la réduction du spot de fluorescence dans un microscope à balayage laser [1]. Cette réduction est obtenue par un second laser (le laser STED), qui peut désexciter, ou éteindre, les molécules par émission stimulée, bien connue de la physique des lasers. En façonnant le laser STED comme un doughnut, il peut supprimer la fluorescence sur le bord du point d'excitation, tout en la laissant intacte au milieu du doughnut, ce qui augmente efficacement la résolution spatiale du microscope (Fig. 1).

Bien que la technique de rétrécissement du spot tende à offrir une résolution spatiale moindre (~50 nm) que d'autres techniques de SRM basées sur la localisation de molécules uniques (voir les autres articles de ce numéro), elle s'accompagne naturellement d'une section optique supérieure (en raison de leur conception à balayage laser comme la microscopie confocale et la microscopie biphotonique) et d'une vitesse supérieure (quelques secondes ou moins suffisent pour une image super-résolue, selon le nombre de pixels). La microscopie STED est bien adaptée à l'imagerie volumétrique de fluorophores hautement concentrés et diffusibles, et a ouvert la voie à l'imagerie à l'échelle nanométrique dans des préparations épaisses de tissus cérébraux et même dans le cerveau intact in vivo. Dans le cas de la STED, la formule d'Abbe prend la forme modifiée :

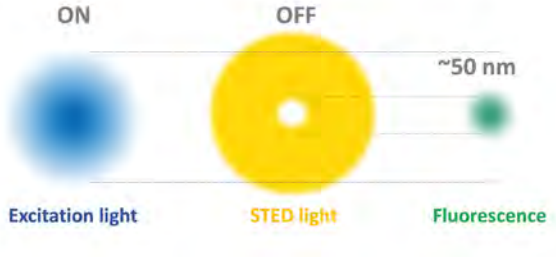
$$\Delta r = \frac{\lambda}{2NA\sqrt{1 + \frac{I_{STED}}{I_{sat}}}} \qquad (2)$$

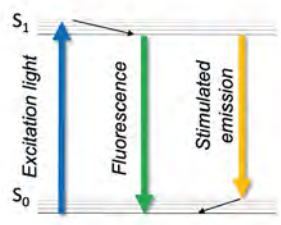
où I_{STED} est l'intensité du laser STED et I_{sat} l'intensité à laquelle la moitié des molécules sont désexcitées.

APPLICATIONS DE LA MICROSCOPIE STED EN NEUROSCIENCES

Dans les paragraphes qui suivent, nous allons illustrer plusieurs exemples tirés de nos propres travaux où la microscopie STED a apporté une différence cruciale, en mettant au jour de nouvelles connaissances biologiques sur la structure et la fonction à l'échelle nanométrique des cellules du cerveau.

Figure 1. Principe de la microscopie STED. En plus d'un laser d'excitation, un microscope STED est équipé d'un laser STED qui peut désexciter les molécules. En façonnant ce laser comme un doughnut, il peut fortement supprimer la fluorescence sur le bord du spot d'excitation, augmentant ainsi la résolution spatiale.





La plasticité du col de l'épine régule la compartimentation des synapses

Les épines dendritiques sont de minuscules protubérances de la membrane externe des neurones qui forment l'extrémité réceptrice (ou partie postsynaptique) des synapses les recherches intensives menées depuis plus d'un siècle, ces belles structures restent assez énigmatiques. De forme évidente, avec une tête proéminente et un cou allongé, les épines transforment les signaux synaptiques par une compartimentation chimique et électrique. Cependant, l'impact de la morphologie des épines sur la compartimentation des synapses reste difficile à évaluer, car les épines, en particulier leur cou, sont petites et difficiles à résoudre. Grâce à une combinaison de STED et de techniques électrophysiologiques, nous avons pu mettre en lumière la relation entre la structure à l'échelle nanométrique et la fonction des épines (Fig. 2a) [2].

Nous avons démontré que les cous des épines deviennent sensiblement plus larges et plus courts après l'induction de la plasticité synaptique. Ces changements pourraient refléter un mécanisme structurel permettant de renforcer les synapses, car tout changement réduisant la résistance électrique du col de l'épine conduit à diminuer l'amplitude des potentiels-synaptiques électriques dans la tête de l'épine.

Contre-intuitivement, cette réduction du signal électrique rendrait en fait la synapse plus forte, en empêchant le signal de saturer, ce qui maintiendrait la synapse dans une bonne gamme dynamique. Cet effet de désinhibition deviendra physiologiquement important, lorsque • • •

le signal synaptique et la résistance du cou sont très élevés, ce qui est le cas pour les épines à tête large et à cou long ou fin [3].

La plasticité des axones règle la vitesse de conduction des impulsions nerveuses

Les axones sont l'équivalent biologique des câbles électriques, conduisant les impulsions nerveuses, appelées potentiels d'action (AP), reliant différentes cellules et zones du cerveau entre elles et déterminant la « vitesse d'horloge » du traitement des informations par les circuits cérébraux. D'après la plupart des manuels, la conduction des AP se fait de manière tout ou rien et de manière très stéréotypée. Cependant, au cours des 20 dernières années, il a été démontré que les axones disposent d'une variété de moyens sophistiqués pour réguler la conduction AP et la transmission synaptique.

Grâce à l'imagerie STED time-lapse couplée à l'électrophysiologie dans des tranches de cerveau hippocampique, nous avons montré que les tirs de AP à haute fréquence induisaient un élargissement physique des axones (Fig. 2B), où les boutons axonaux (la partie présynaptique d'une synapse) présentaient une augmentation transitoire, suivie d'un élargissement durable des tiges axonales intermédiaires. Ces dynamiques structurelles ont été reflétées par des changements bidirectionnels dans la vitesse de conduction du AP.

Ces résultats ont révélé un nouveau mécanisme de plasticité structurelle, qui règle le timing de la signalisation électrique rapide [4].

Des nanostructures astrocytaires génèrent des signaux calciques au niveau des synapses « tripartites » entre la glie et les neurones

Les astrocytes, un type de cellules gliales du cerveau, ont une morphologie qui est encore plus élaborée et miniaturisée que celle des neurones. Leurs spécialisations morphologiques à l'échelle nanométriques s'enroulent autour des synapses, formant ce qu'on appelle des synapses tripartites, réglant la transmission et la plasticité des synapses, affectant la fonction des circuits et le comportement animal. Ces structures gliales sont responsables de l'absorption du glutamate dans la fente synaptique, de l'absorption d'ions « neurophysiologiques » comme le K^+ et semblent libérer des substances neuroactives. Mais comme ils ont un aspect très flou sous un microscope normal, il a été difficile d'observer comment les astrocytes interagissent avec les synapses. Pour surmonter ce problème, nous nous sommes tournés encore vers la microscopie STED en 3D et l'avons combinée avec l'imagerie du Ca^{2+} pour évaluer leur activité de signalisation.

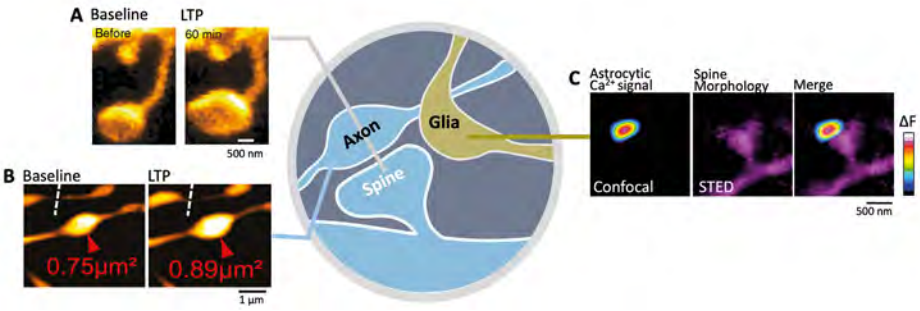
Nous avons observé que ces structures astrocytaires forment un maillage réticulaire de noeuds et d'arbres qui étaient fréquemment disposés en anneaux. Les noeuds donnent lieu à des signaux Ca^{2+} spontanés, qui ont tendance à rester confinés, mais qui peuvent aussi se propager aux noeuds voisins *via* les arbres. La cartographie des signaux Ca^{2+} sur la morphologie résolue par STED a montré que l'activité Ca^{2+} astrocytaire était principalement associée à des synapses uniques (Fig. 2c) [5]. Dans l'ensemble, cette étude a pu démontrer l'organisation à l'échelle nanométrique des astrocytes dans les tissus cérébraux vivants, en identifiant les noeuds astrocytaires comme la structure anatomique insaisissable qui permet aux astrocytes de communiquer « en privé » avec milles de synapses différentes en parallèle.

Super-resolution shadow imaging de l'espace extracellulaire

Malgré tous ses points forts, la microscopie à fluorescence présente le net désavantage de ne voir que ce que l'on étiquette, ce qui laisse le reste dans l'ombre. Pour obtenir une vue d'ensemble, nous avons mis au point une stratégie « inversée », simple mais convaincante, pour marquer le tissu cérébral. Au lieu de marquer les cellules individuelles, nous marquons et visualisons les espaces entre les cellules, en utilisant un colorant fluorescent hautement diffusible mais imperméable aux membranes et un microscope STED en 3D. L'ensemble de ces espaces intermédiaires est appelé l'espace extracellulaire du cerveau (ECS), qui représente environ 20 % du volume du cerveau et contient le liquide céphalorachidien et la matrice extracellulaire.

Nous avons baptisé cette technique « Super-Resolution Shadow Imaging » ou SUSHI [6], car toutes les cellules apparaissent comme des ombres sombres dans une mer lumineuse de fluorescence. *SUSHI* génère

Figure 2. Relier la nano-anatomie et la physiologie en utilisant la microscopie STED en direct. **(a)** L'élargissement du col d'un épine dendritique accompagné de l'élargissement de la tête de l'épine a été détecté lors de la plasticité synaptique. **(b)** Un élargissement significatif des boutons axonaux lors de la plasticité synaptique a été observé, suivi d'un élargissement des tiges axonales. (c) La cartographie des signaux Ca^{2+} astrocytaires sur l'image STED des épines a révélé que ces signaux Ca^{2+} peuvent être spécifiques aux épines individuelles.



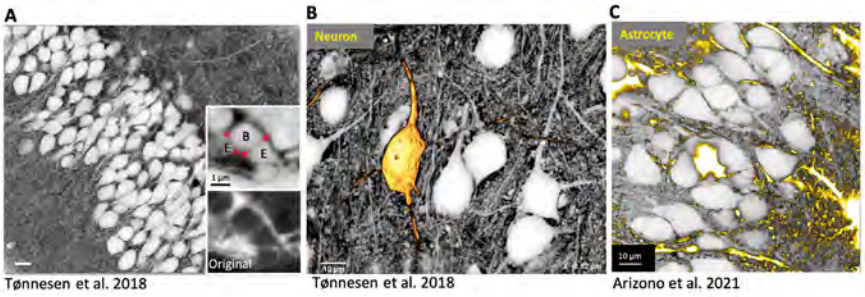


Figure 3. (a) Une image SUSHI inversée montrant les empreintes négatives de toutes les cellules du cerveau dans le tissu. Ceci peut être combiné avec un marquage positif d'un type de cellule particulier tel que les neurones (*E* = épine dendritique ; *B* = bouton axonale, marqueurs en rouge = fente synaptique) (b) et les astrocytes (c). Modifié à partir de Arizono *et al.* 2021 Neuroforum.

une empreinte négative super-résolue de l'espace occupé par les structures cellulaires liées à la membrane (figure 3). Bien que le marquage soit par nature non spécifique, les différentes cellules et leurs structures subcellulaires peuvent être facilement distinguées en fonction de leur forme, y compris les fentes synaptiques (Fig. 3). Le marquage de l'ECS plutôt que des cellules individuelles présente plusieurs avantages pratiques. Il est facile à appliquer et beaucoup plus résistant au photoblanchiment et à la phototoxicité, car le colorant se trouve à l'extérieur des cellules. C'est un grand avantage de ne pas avoir à introduire un colorant dans les cellules, action qui peut être très invasive voire même impossible.

De plus, il y a un grand intérêt à étudier l'ECS en tant que tel, ce qui peut être fait en utilisant *SUSHI*. Entourant toutes les cellules, l'ECS est la station de transit obligatoire pour les molécules de signalisation extracellulaire et les substances thérapeutiques, influençant la communication neuronale et l'efficacité des traitements médicamenteux.

Physiologiquement régulé et très sensible aux stimulations expérimentales, l'ECS constitue une scène tridimensionnelle dynamique et influente sur le plan biophysique, où les neurones et les cellules gliales agissent de concert. En tant que technique polyvalente, *SUSHI* peut être facilement appliquée à d'autres tissus et organes, des tumeurs aux glandes salivaires [7]. ●

RÉFÉRENCES

[1] SW. Hell, Science **316**, 1153-8 (2007). doi: 10.1126/science.1137395

[2] J. Tønnesen, G. Katona, B. Rózsa, U.V. Nägerl, Nat; Neurosci. **17**, 678-85 (2014) doi: 10.1038/nn.3682

[3] J. Tønnesen, U.V. Nägerl, Front Psychiatry. **7**, 101 (2016) doi: 10.3389 fpsyt.2016.00101

[4] R. Chéreau, G.E. Saraceno, J. Angibaud, D. Cattaert, U.V. Nägerl, "*Super-resolution imaging reveals activity-dependent plasticity of axon morphology linked to changes in action potential conduction velocity,*" Proc. Natl. Acad. Sci. USA. **114**, 1401-1406 (2017) doi: 10.1073/pnas.1607541114

[5] M. Arizono, V.V.G.K. Inavalli, A. Panatier *et al.*, Nat Commun. **11**, 1906 (2020) doi: 10.1038/s41467-020-15648-4

[6] J. Tønnesen, V.V.G.K. Inavalli, U.V. Nägerl, Cell. **172**, 1108-1121 (2018) doi: 10.1016/j.cell.2018.02.007

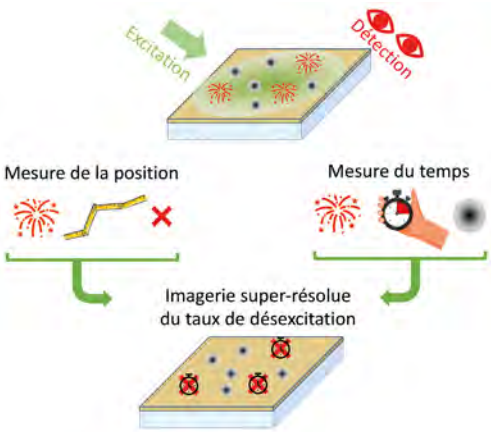
7) B. Stolp, F. Thelen, X. Ficht, L. M. Altenburger *et al.*, Sci. Immunol. 5, eaaz4371 (2020) doi: 10.1126/sciimmunol.aaz4371

DES NANOTORCHES POUR ÉTUDIER LES MATÉRIAUX NANOSTRUCTURÉS

Ignacio IZEDDIN[1], Valentina KRACHMALNICOFF[1]*

[1] Institut Langevin, ESPCI Paris, Université PSL, CNRS, 75005 Paris, France

***valentina.krachmalnicoff@espci.fr**



La nanophotonique s'intéresse à la génération et au contrôle de la lumière grâce à la nanostructuration de la matière, ainsi qu'à l'imagerie de ces nanostructures. Mais comment étudier les propriétés optiques de ces matériaux à l'échelle nanométrique ? Dans cet article, nous présentons une nouvelle technique inspirée d'approches de microscopie à super-résolution établies en bioimagerie que nous avons adaptée au domaine de la nanophotonique dans le but d'obtenir des cartographies super-résolues de l'interaction lumière-matière.

https://doi.org/10.1051/photon/202211440

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

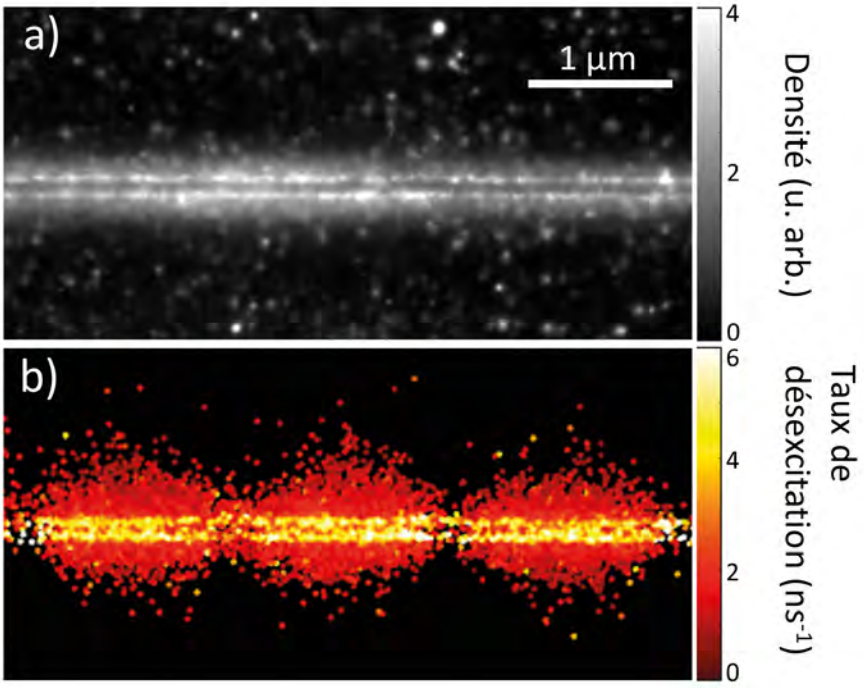
La nanophotonique est une branche de l'optique qui étudie des phénomènes qui ont lieu à des échelles nanométriques. Ceci comprend l'étude et la manipulation de l'interaction de la lumière avec des objets nanostructurés ou avec des particules de taille inférieure à la longueur d'onde. L'utilisation de particules métalliques pour modifier les propriétés de la lumière était connue dès l'antiquité [1]. L'éclat des couleurs des vitraux de la Sainte Chapelle à Paris trouve son origine dans la présence de nanoparticules métalliques à l'intérieur du verre. En effet, lorsque la lumière éclaire une nanoparticule métallique, les électrons présents dans le matériau oscillent périodiquement, ce qui crée un mouvement de charges électriques à la surface de la particule, appelé plasmon de surface. La longueur d'onde des plasmons de surface dépend non seulement de la nature du matériau qui compose la particule, mais aussi de sa taille et de sa forme. Les propriétés extraordinaires des plasmons dans des particules métalliques, dans des assemblages de nanoparticules métalliques ou dans des surfaces métalliques nanostructurées, en ont fait des candidats d'exergue pour manipuler les propriétés optiques de la lumière et pour accroître l'interaction lumière-matière à des échelles sub-longueur d'onde.

Les nouvelles techniques de fabrication d'objets structurés à

l'échelle nanométrique ont rendu possible la manipulation des matériaux les plus disparates, allant des métaux, aux matériaux diélectriques, aux semi-conducteurs. L'explosion des nanotechnologies au cours des dernières décennies a créé le besoin de développer des stratégies et des outils permettant de mener des études à de telles échelles. La nanophotonique répond à ces demandes selon deux axes principaux : la génération et le contrôle de la lumière par la manipulation de nouveaux matériaux avec des propriétés optiques innovantes, et l'imagerie à l'échelle du nanomètre des propriétés optiques des nanostructures, ce qui a poussé la recherche scientifique vers le développement de méthodes d'imagerie non-conventionnelles [2]. Si l'on est capable de manipuler la lumière à de telles échelles, on doit aussi être capable d'observer les résultats de telles manipulations, ce qui constitue un défi en soi à cause de la limite de résolution des systèmes optiques conventionnels. En effet, la limite de résolution est une conséquence du phénomène de diffraction de la lumière, déjà décrit par Ernst Abbe en 1873. L'image d'un point ou PSF pour *point-spread function* est une tache de diffraction et la résolution est ainsi limitée, selon le critère d'Abbe, à $d_{Abbe} = \lambda/2ON$, avec λ la longueur d'onde et ON l'ouverture numérique du système, qui est typiquement de l'ordre de 250 nm pour la lumière visible et avec des objectifs de microscope de grande ouverture numérique.

Le besoin d'observer les interactions de la lumière avec la matière nanostructurée a mené au développement de techniques d'imagerie super-résolue et de sondes nanoscopiques en champ proche. Cependant, les désavantages de telles techniques, dont le coût des instruments, la complexité de leur mise en œuvre et de l'interprétation des signaux que l'on peut en extraire, ont poussé les chercheurs à se tourner vers des techniques d'imagerie en champ lointain super-résolues qui ont révolutionné, il y a une vingtaine d'années, l'imagerie des systèmes biologiques.

Figure 1. Imagerie super-résolue de molécules uniques à proximité d'un nanofil d'argent. **(a)** Densité de molécules détectées. **(b)** Image du taux de désexcitation des molécules. Les trois zones circulaires sont un effet de la forme du champ de vue de la détection [5].



ARDOP INDUSTRIE
VOTRE PARTENAIRE :
Photométrie
Radiométrie & Colorimétrie
Radiomètres UV-C
Désinfection
Contrôle de source UV (LED UV, Excimer & Mercure basse pression)
Polymérisation

Colorimètres & Vidéocolorimètres
Mesures de l'uniformité en couleur ou luminance de vos sources ou displays

Nouveau Spectroradiomètre IR
Technologie BiTec : détecteur à matrice InGaAs + diode InGaAs
Refroidissement thermoélectrique
Plage spectrale 950-2150nm

www.ardop.com
sales@ardop.cpm
+33 5 40 25 05 36

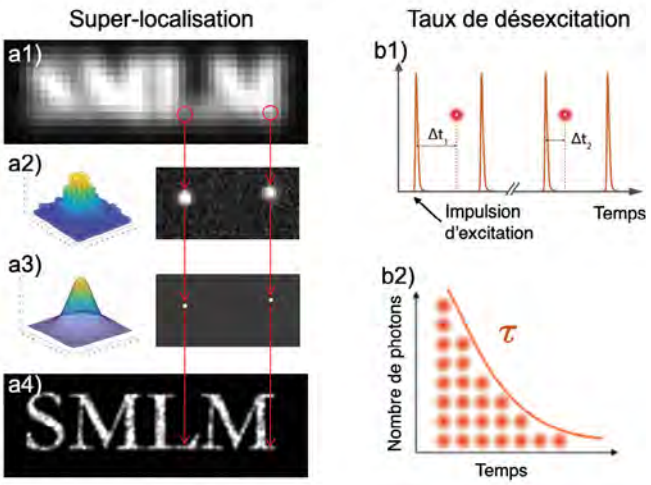
LA MICROSCOPIE DE SUPER-RÉSOLUTION EN CHAMP LOINTAIN

En raison de sa spécificité moléculaire et de sa compatibilité avec la cellule vivante, la microscopie à fluorescence est un outil fondamental des sciences biologiques. En effet, l'imagerie biologique a vécu une véritable révolution avec l'irruption de la microscopie à fluorescence super-résolue [3]. E. Betzig, S. W. Hell et W. E. Moerner ont reçu le prix Nobel de Chimie en 2014 pour leurs contributions dans ce domaine en démontrant, avec des stratégies conceptuellement différentes, qu'il était possible de contourner la limite de résolution imposée par la diffraction. Le type de microscopie que nous allons détailler dans cet article est basée sur l'excitation et la détection de molécules uniques et est connue sous l'acronyme SMLM, pour *Single-Molecule Localization Microscopy*. Comme expliqué dans l'encart, la microscopie SMLM repose sur le fait que l'on peut localiser la position d'un émetteur isolé avec une précision bien supérieure à la largeur de l'image de la molécule et qui ne dépend que du nombre de photons détectés. Lors d'une expérience typique de SMLM, la précision de localisation est de l'ordre de 10 nm. Le deuxième pilier de l'imagerie SMLM s'appuie sur la capacité d'isoler l'émission de fluorescence d'un émetteur unique parmi un ensemble dense. À l'origine, ceci a été possible grâce au développement des sondes fluorescentes photoactivables. En contrôlant le taux de probabilité de la transition inactif/actif de chaque fluorochrome avec un laser de photoactivation, on peut arriver au régime de détection d'émetteurs isolés. Pour réaliser une image super-résolue par SMLM, on enregistre une série d'images de molécules isolées spatialement qu'on localisera par la suite avec une précision de quelques nanomètres. En superposant la position de tous les émetteurs détectés, on parvient à générer une image super-résolue avec une résolution qui n'est en principe limitée que par le nombre de photons détectés pour chaque fluorochrome et par la capacité à échantillonner correctement l'objet d'intérêt.

VOIR À L'ÉCHELLE DU NANOMÈTRE… ET DE LA PICOSECONDE : LE SMFLIM

La nanostructuration de la matière modifie ses propriétés photoniques. Un émetteur fluorescent isolé s'avère être la sonde ultime idéale pour sonder ces modifications locales du champ électromagnétique. L'intensité de fluorescence et le taux de désexcitation de la molécule sont les deux grandeurs qui permettent de sonder la réponse de la molécule à l'environnement optique dans lequel elle se trouve. En particulier, le taux de désexcitation donne accès à la densité locale d'états électromagnétiques

Obtenir des images spatialement super-résolues de la densité locale d'états électromagnétiques (LDOS)



Super-localisation : Dans une image de microscopie à fluorescence classique où tous les fluorochromes émettent simultanément, la résolution spatiale de l'image est limitée par la diffraction (a1). En imagerie SMLM, les émetteurs individuels sont activés de manière stochastique et ils sont imagés comme des PSFs individuelles jusqu'au photoblanchiment (a2). Ce processus est répété pendant des dizaines de milliers d'images. Pour chaque image, les PSFs des molécules uniques sont identifiées et ajustées avec une fonction gaussienne pour retrouver leur centre de masse (a3). Par la suite, une image pointilliste superrésolue peut être reconstruite (a4), où la taille choisie du point de reconstruction reflète typiquement la précision de la localisation.

Taux de désexcitation : Un laser impulsionnel excite un fluorochrome. L'intervalle de temps Δt_i entre l'impulsion excitatrice et l'émission d'un photon fluorescent est mesuré avec une précision de l'ordre de la picoseconde (b1).
Les temps d'arrivée Δt_i sont reportés dans un histogramme qui donne la décroissance de la fluorescence en fonction du temps. Un ajustement exponentiel de l'histogramme est généralement utilisé pour retrouver le temps caractéristique de décroissance de fluorescence τ qui est l'inverse du taux de désexcitation (b2).

(LDOS pour local density of states) qui mesure le nombre de modes optiques accessibles dans un environnement spécifique.

Comment mesurer simultanément la position et le taux de désexcitation fluorescente d'un émetteur ? Afin de répondre à ce défi, les chercheurs de l'Institut Langevin à l'ESPCI Paris – PSL, CNRS, ont développé la technique smFLIM pour *single-molecule fluorescence lifetime imaging microscopy*, qui combine l'imagerie de super-résolution SMLM, et la mesure du temps de désexcitation de chaque molécule. Pour obtenir une cartographie super-résolue avec la technique smFLIM, il faut d'abord recouvrir la nanostructure avec une couche très dense de fluorochromes photoactivables. On veillera à ce que seulement un sous-ensemble des fluorochromes soient actifs à un instant t, pour imager des PSFs bien isolées et pouvoir dérouler une acquisition de type SMLM (voir encart). Contrairement aux expériences SMLM classiques, on excite le tapis de fluorochromes avec un laser impulsionnel, pour permettre une mesure du taux de désexcitation (voir encart). La recombinaison de ces deux mesures permet de reconstruire une image super-résolue du taux de désexcitation et donc de la LDOS, comme illustré dans la figure à gauche du resumé. Avec le système développé à l'Institut Langevin, il est possible d'imager en smFLIM, avec une résolution de 10 nm, un champ de vue de l'ordre de 10 µm^2, et ceci pour tout type de structure, qu'elle soit déterministe, périodique ou aléatoire, métallique ou diélectrique.

ÉTUDE D'UN SYSTÈME NANOSTRUCTURÉ SIMPLE : LE NANOFIL D'ARGENT

Parmi les systèmes les plus simples qu'on peut étudier en nanophotonique on compte les nanofils métalliques. La Fig.1a reporte une image super-résolue de la densité de molécules détectées obtenue pour un fil d'argent de plusieurs microns de longueur et de 115 nm de diamètre. Chaque point représente une molécule détectée avec une précision d'environ 15 nm. On remarquera une zone foncée qui semble couper le fil en deux. Dans cette zone, le nombre de molécules détectées est très faible. Ceci est dû au fait que la lumière qui éclaire le fil est modifiée par la présence du fil qui est à l'origine d'une zone d'ombre à son sommet.

Le caractère métallique du nanofil lui confère des propriétés intéressantes en termes de LDOS. En effet, plus une molécule fluorescente s'approche du nanofil d'argent, pour des distances allant de la centaine de nanomètres au contact, plus la LDOS sera grande, ce qui se traduit par une augmentation du taux de désexcitation des molécules. L'image du taux de désexcitation obtenue en smFLIM à proximité d'un fil d'argent est présentée dans la Fig.3b et illustre de façon très ● ● ●

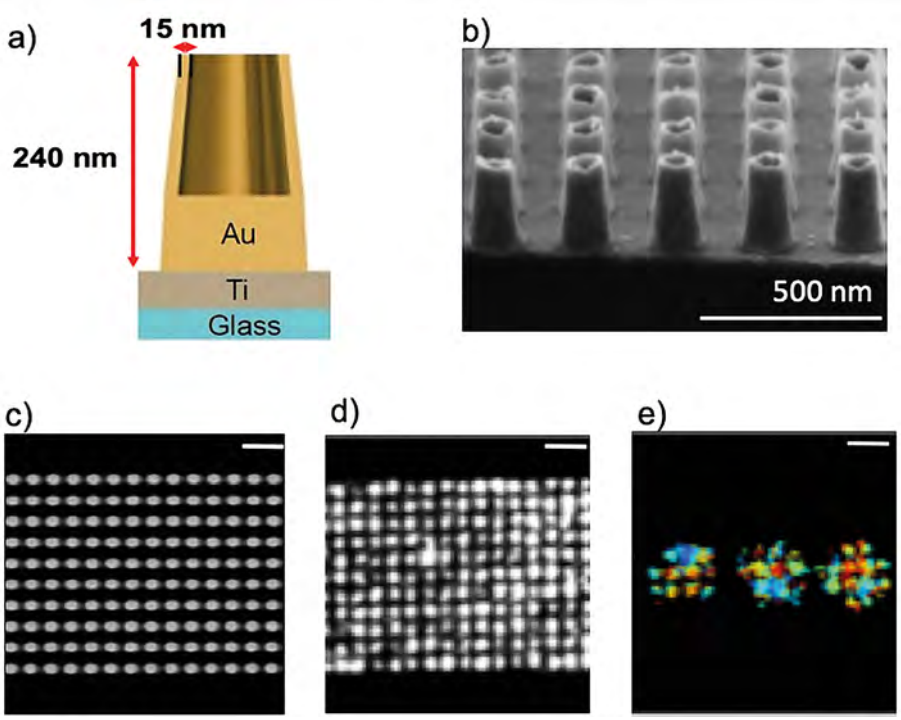


Figure2. (a) Dessin en coupe d'une nanocheminée en or.
(b) Image au microscope éléctronique à balayage (MEB) de l'arrangement périodique de nanocheminées.
(c) Image MEB de l'arrangement périodique de nanocheminées vu d'en haut.
(d) Image de la densité de détections de molécules uniques.
(e) Image du taux de désexcitation. Les différentes couleurs indiquent différentes valeurs du taux de désexcitation. Dans c-e, la barre d'échelle indique une longueur de 500 nm.

simple et visuelle le phénomène décrit plus haut. Lorsque les molécules sont proches du fil, on mesure des taux de désexcitation élevés (couleur jaune), alors que les taux de désexcitation sont plus faibles pour les molécules détectées loin du fil (couleur rouge). Pour plus d'information sur ce sujet le lecteur pourra se reporter à l'article [5].

VERS L'ÉTUDE DE NANOSTRUCTURES COMPLEXES AUX PROPRIÉTÉS OPTIQUES INATTENDUES

La technique smFLIM ouvre d'importantes perspectives pour l'étude à l'échelle nanométrique des propriétés optiques de systèmes bien plus complexes qu'un nanofil. La figure 2 illustre les résultats obtenus sur un système nanostructuré qui est un arrangement périodique de nanocheminées d'or. Le dessin en coupe d'une nanocheminée est reporté sur la Fig.2a. Chaque nanocheminée est à une distance d'environ 250 nm de ses plus proches voisines. Une image prise au microscope électronique à balayage de l'échantillon est reportée dans la Fig.2b et permet de visualiser l'arrangement périodique des structures individuelles. Cet échantillon a été fabriqué au Mesa+ Institute, University of Twente.

Les propriétés optiques à l'échelle nanométrique peuvent être étudiées avec le smFLIM en exploitant toute l'originalité de cette technique, à savoir la capacité d'observer l'interaction lumière-matière à l'échelle nanométrique sur des zones de l'échantillon qui font plusieurs microns carrés. Les figures 2 c-e sont un exemple des données obtenues. La Fig.2c est une image au microscope électronique à balayage de l'échantillon vu d'en haut et la Fig.2d reporte la densité de molécules uniques détectées à la surface des cheminées. L'arrangement périodique est visible dans l'image super-résolue du taux de désexcitation (Fig. 2 e). La couleur des points encode la valeur du taux de désexcitation mesuré. En étudiant minutieusement les valeurs du taux de désexcitation mesurés en fonction de la position où la molécule est détectée, il sera possible de comprendre en détail les phénomènes physiques qui pilotent les propriétés optiques de cette structure. Cette étude est actuellement en cours de réalisation.

CONCLUSION

En conclusion, la combinaison d'outils issus de la bioimagerie à super-résolution avec ceux de la nanophotonique s'avère très fructueuse et capable de répondre à des nouveaux défis de l'optique moderne. Dans cet article, nous avons montré que la microscopie SMLM, en combinaison avec des mesures de désexcitation de fluorescence, peut aider à mieux comprendre l'interaction fondamentale entre la lumière et la matière dans des dispositifs et structures nanophotoniques. Nous avons décrit un nouveau montage expérimental, nommé smFLIM, capable de mesurer simultanément la position et la durée de vie de fluorescence de fluorochromes uniques pour obtenir des images super-résolues de LDOS, et nous espérons que cet article inspirera des nouveaux développements à l'interface de ces deux domaines.

RÉFÉRENCES

[1] M. Stockmann, Physics Today 64, 39 (2011)

[2] A. F. Koenderink *et al.*, Nanophotonics 11, 169-202 (2022)

[3] S.W. Hell, Science 316, 1153 – 1158 (2007)

[4] D. Bouchet *et al.*, Optica 6, 135-138 (2019)

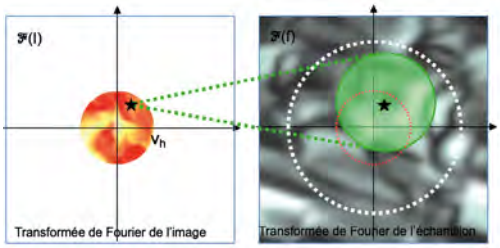
[5] G. Blanquer *et al.*, ACS Photonics 7, 393-400 (2020)

AMÉLIORER LA RÉSOLUTION DE LA MICROSCOPIE OPTIQUE DE FLUORESCENCE

Anne SENTENAC[1]

[1] Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, 13013 Marseille, France

***anne.sentenac@fresnel.fr**



La microscopie de fluorescence est un outil majeur, en particulier pour étudier le fonctionnement du vivant au niveau cellulaire, mais sa résolution est limitée à quelques centaines de nanomètres. Ces vingt dernières années, différentes techniques ont été proposées pour descendre la résolution sous la barre des 100 nm. Cet article essaie de présenter leurs principes de manière unifiée.

https://doi.org/10.1051/photon/202211445

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.

Dans sa version moderne, le microscope optique est composé d'un objectif de très petite focale et d'une lentille « de tube » ayant une focale beaucoup plus grande. L'échantillon, inséré entre deux lamelles de verre, est éclairé de manière homogène par une lampe et la lumière transmise ou émise passe à travers l'objectif et la lentille de tube pour être captée par une caméra. Le rôle de l'objectif et de la lentille de tube est d'obtenir au niveau de la caméra placée au plan focal image du microscope une distribution d'intensité lumineuse la plus proche possible de celle existant dans l'échantillon au plan de mise au point (appelé plan focal objet) avec un grossissement fixé par le rapport entre la focale de la lentille de tube et celle de l'objectif. Cependant, même avec un objectif parfait (et un grossissement unité pour simplifier la discussion), la distribution d'intensité est modifiée par la propagation de la lumière d'un plan à l'autre. En effet, les ondes électromagnétiques qui peuvent atteindre le plan d'observation ont une variation spatiale contrainte par leur longueur d'onde (nommée λ dans la suite de l'exposé) si bien que le motif d'intensité au plan image ne peut exhiber de fréquences spatiales supérieures à $2/\lambda$, voir Figure 1. La microscopie optique super-résolue répond donc à un défi fondamental: comment, à partir d'images dont la fréquence spatiale maximum est $2/\lambda$, obtenir des informations sur les fréquences spatiales de l'échantillon plus grandes que $2/\lambda$. Les solutions proposées nécessitent de comprendre le lien entre l'image, qui correspond à une intensité lumineuse, et le paramètre de l'échantillon qui gouverne l'interaction lumière-matière, indice de réfraction pour les microscopes à transmission, ou densité de fluorescence pour les microscopes de fluorescence. Dans cet article, nous étudierons uniquement ces derniers car ils ont connu un essor spectaculaire grâce au développement de la chimie des fluorophores, et c'est dans ce cadre que la plupart des recherches sur la super-résolution ont été conduites.

MODÉLISATION DE L'IMAGE D'UN MICROSCOPE DE FLUORESCENCE

Les fluorophores sont des molécules capables, lorsqu'elles sont éclairées à une certaine longueur d'onde λ_E, d'émettre de la lumière à une longueur d'onde λ légèrement plus grande. La possibilité de fixer les fluorophores sur n'importe quelle molécule d'intérêt (comme des protéines spécifiques) ont fait de cette technique de marquage un outil majeur pour étudier les processus moléculaires à l'œuvre dans les cellules et tissus vivants. Pour en tirer profit, le microscope optique s'est adapté : la lampe a été remplacée par des diodes luminescentes ou des lasers permettant d'obtenir un éclairement homogène à une longueur d'onde précise (vert) et un filtre spectral a été placé juste avant la caméra pour ne laisser passer que la lumière émise par les fluorophores (rouge). Les rayonnements émis par les fluorophores étant incohérents entre eux, l'intensité lumineuse enregistrée par la caméra au plan d'observation est la somme des intensités provenant de chaque fluorophore, Figure 2.

La capacité des fluorophores à émettre de la lumière dépend de leur nature, de leur environnement et de l'éclairement reçu. Dans les conditions standard (puissance incidente de quelques dizaines de watts par centimètre carré), les fluorophores les plus courants émettent proportionnellement à l'intensité de l'éclairement. Cependant, un travail important de recherche a été mené pour modifier ce comportement. En utilisant des molécules sophistiquées, des éclairements intenses (milliers de watts par centimètre carré) et/ou des milieux de montage particuliers, la fluorescence peut saturer, devenir stochastique ou même être inhibée.

Pour modéliser le lien entre l'image et l'échantillon, nous considérons le cas simplifié où l'échantillon, supposé infiniment fin et placé au plan focal objet, est représenté par sa densité (surfacique) de fluorescence $f(\mathbf{r})$. Nous introduisons une fonction d'excitation $E(\mathbf{r})$ qui décrit la capacité à exciter (et donc à faire rayonner) localement un fluorophore placé en $\mathbf{r}$. Dans le régime standard, $E(\mathbf{r})$ est proportionnel à l'intensité de l'éclairement, en régime de saturation-inhibition, $E(\mathbf{r})$ dépend de manière non linéaire de l'éclairement (avec en particulier des effets de seuil) et en régime stochastique, $E(\mathbf{r})$ est une fonction aléatoire. Enfin, nous introduisons la fonction d'observation (fonction d'étalement du point) h correspondant à la distribution d'intensité lumineuse obtenue au plan image d'un fluorophore placé à l'origine. Avec ces notations, l'image peut être modélisée par:

$$I(\mathbf{r})= \int f(\mathbf{r'})E(\mathbf{r'})h(\mathbf{r}-\mathbf{r'})d\mathbf{r'}. \quad (1)$$

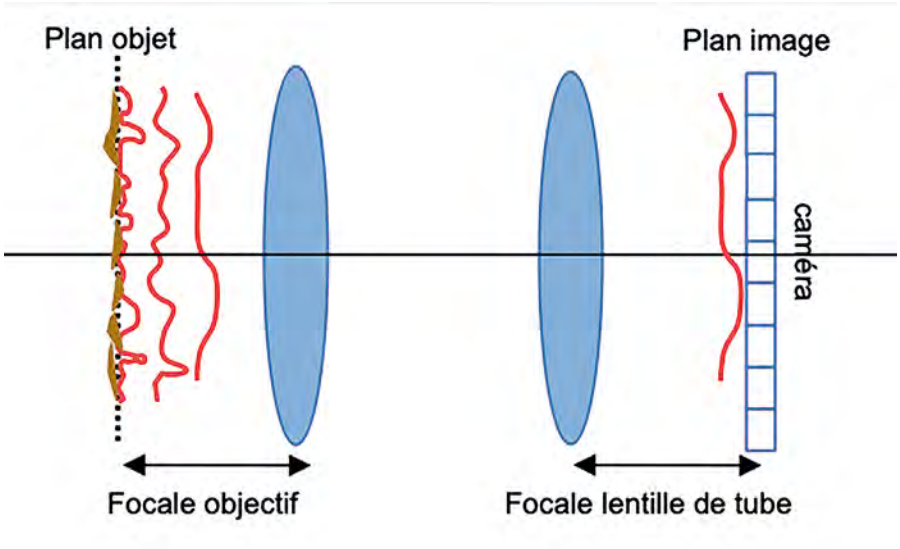
À cause de la propagation de la lumière jusqu'au plan image, la fonction d'observation h et l'image I ne contiennent aucune fréquence spatiale supérieure à $v_h=2/\lambda$ où λ est la longueur d'onde émise par les fluorophores. Autrement dit, leurs transformées de Fourier $\mathcal{F}[h]$ et $\mathcal{F}[I]$ valent zéro pour toutes les fréquences au delà de v_h. Quand l'excitation est uniforme, $E(\mathbf{r})=A$, ce qui est le cas en microscopie de fluorescence classique, la transformée de Fourier de l'image dépend de la transformée de Fourier de l'échantillon, via, $\mathcal{F}[I](\mathbf{v})=A\mathcal{F}[h](\mathbf{v})\mathcal{F}[f](\mathbf{v})$ (voir encart). Ainsi, seules les fréquences spatiales de l'échantillon inférieures à v_h sont accessibles sur l'image. Supposons maintenant que l'excitation ne soit pas uniforme et que sa fréquence spatiale maximale soit v_E. Dans ce cas, la transformée de Fourier de l'image s'écrit,

$$\mathcal{F}[I](\mathbf{v})=\mathcal{F}[h](\mathbf{v})\int\mathcal{F}[f](\mathbf{v}-\mathbf{v'})\mathcal{F}[E](\mathbf{v'})d\mathbf{v'} \quad (2)$$

et l'on constate qu'elle est sensible aux fréquences spatiales de l'échantillon jusqu'à v_h+v_E, voir Figure 3.

Le fait qu'une image basse résolution puisse contenir des informations sur les fréquences élevées de l'échantillon est à la base de toutes les techniques de modulation : le signal (ici la densité de fluorescence, f) est modulé par une porteuse (la fonction d'excitation, E) pour être adapté au canal de transmission (le microscope, h, agissant comme un filtre passe bas). Toute la difficulté

Figure 1 : Schéma simplifié d'un microscope de grossissement unité. On a représenté en rouge l'intensité lumineuse (à la longueur d'onde λ) transmise (ou émise) par l'échantillon (en marron) placé au plan objet et illustré la perte des fréquences spatiales élevées induite par la propagation de la lumière. L'intensité mesurée au niveau du plan focal image ne présente pas de fréquences spatiales supérieures à $v_h=2/\lambda$



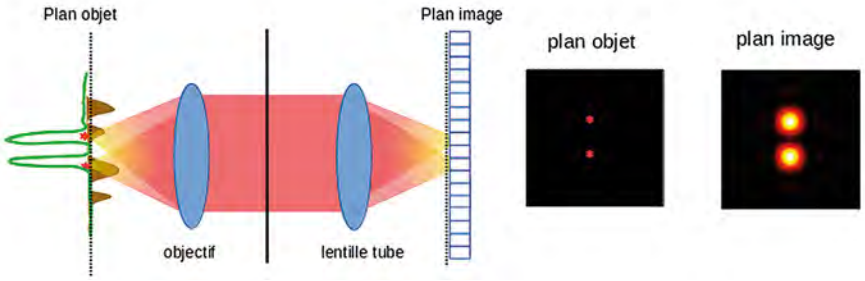


Figure 2 : Schéma simplifié d'un microscope de fluorescence. Les fluorophores, représentés par une densité de fluorescence f, en marron, sont excités proportionnellement à une fonction d'excitation E (en vert) dépendant d'un éclairement à λ_E. Ils rayonnent à $\lambda>\lambda_E$ (en rouge) et un filtre ne laisse passer que la lumière émise à λ. L'intensité lumineuse mesurée sur la caméra est la somme des intensités provenant de chaque fluorophore excité.

consiste à récupérer ces informations (le processus de démodulation). Dans la suite, nous présentons différentes techniques de microscopie super-résolues et nous distinguons celles qui utilisent une 'porteuse' déterministe de celles utilisant une porteuse stochastique, voir Figure 4.

EXCITATION DÉTERMINISTE

Les microscopes super-résolus à balayage

Dans les microscopes super-résolus les plus répandus, la 'porteuse' est une tache la plus petite possible obtenue en focalisant l'éclairement et translatée à la surface de l'échantillon. Lorsque le point de focalisation est en $\mathbf{r}_0$, la fonction d'excitation $E_{\mathbf{r}0}(\mathbf{r})$ (de fréquence spatiale maximale v_E) s'écrit comme $E(\mathbf{r}-\mathbf{r}_0)$ où E correspond à la tache centrée en 0. Pour chaque position $\mathbf{r}_0$, on peut enregistrer des images basse résolution, $I(\mathbf{r},\mathbf{r}_0)=\int f(\mathbf{r}')E(\mathbf{r}'-\mathbf{r}_0)h(\mathbf{r}-\mathbf{r}')d\mathbf{r}'$. En extrayant le pixel correspondant au point de focalisation, il est possible de construire une nouvelle image vérifiant $I_{SR}(\mathbf{r}_0)=I(\mathbf{r}_0,\mathbf{r}_0)=\int f(\mathbf{r}')E(\mathbf{r}'-\mathbf{r}_0)h(\mathbf{r}_0-\mathbf{r}')d\mathbf{r}'$. Cette dernière s'interprète comme la convolution de l'objet avec la fonction $H(\mathbf{r})=E(-\mathbf{r})h(\mathbf{r})$. Or, la fréquence spatiale maximale de H, qui est le produit des fonctions d'excitation et d'observation, est v_E+v_h (voir encart). Cette première technique de 'démodulation', qui correspond au microscope confocal, permet ainsi de remonter aux fréquences spatiales de l'échantillon jusqu'à v_E+v_h. Elle est très utilisée dans le régime d'excitation standard, où $E(\mathbf{r})$ est proportionnel à l'intensité du faisceau focalisé dont la fréquence maximale, v_E, ne peut dépasser $2/\lambda_E$. La résolution théoriquement atteignable, définie comme $1/(v_E+v_h)$ est alors proche de $\lambda/4$, (λ_E étant très proche de λ). La microscopie confocale a aussi été implémentée dans le régime d'inhibition appelé STED (pour Stimulated Emission Depletion). Dans ce cas, v_E peut être bien supérieur à $2/\lambda_E$ car la fonction d'excitation dépend de manière non-linéaire de l'illumination (elle vaut 0 si la puissance d'éclairement dépasse une certaine valeur) et la résolution peut descendre bien en dessous de $\lambda/4$.

Une autre méthode de 'démodulation' appelée ISM (Image Scanning Microscopy) a été popularisée récemment dans le cadre de l'éclairement à balayage. Il a été proposé de former une image super-résolue en combinant numériquement tous les pixels des images basse-résolution $I(\mathbf{r},\mathbf{r}_0)$, selon la formule $I_{SR}(\mathbf{r})=\int I(\mathbf{r}-\mathbf{u},\mathbf{r}+\mathbf{u})d\mathbf{u}$. On constate alors que I_{SR} s'écrit comme la convolution de l'objet avec une fonction $H(\mathbf{r})=\int E(\mathbf{r}-\mathbf{u})h(-\mathbf{r}-\mathbf{u})d\mathbf{u}$, dont la transformée de Fourier, $\mathcal{F}[H](\mathbf{v})=\mathcal{F}[E](\mathbf{v}/2)\times\mathcal{F}[h](\mathbf{v}/2)$ présente une fréquence spatiale maximale qui est le double du minimum entre (v_E,v_h). Lorsque v_E est proche de v_h, cette technique permet d'obtenir la résolution théorique d'un microscope confocal mais de manière beaucoup plus robuste, car, en tirant profit de la totalité des informations contenues dans les images basse-résolution, on améliore significativement le ratio signal sur bruit.

nobrainer.

Lasers for Neuroscience
Perfect solution for 2-photon Microscopy and Optogenetics
FemtoFiber ultra 920 & 1050, vario 1030 HP
- Fully turn-key with integrated AOM and GDD
- No noise-stress for animals thanks to fully air-cooled design
- Compact laser design saving valuable table space
- Low cost of ownership using robust & reliable fiber-laser technology
learn more...
Distributed by OPTON LASER INTERNATIONAL
TOPTICA
www.optonlaser.com

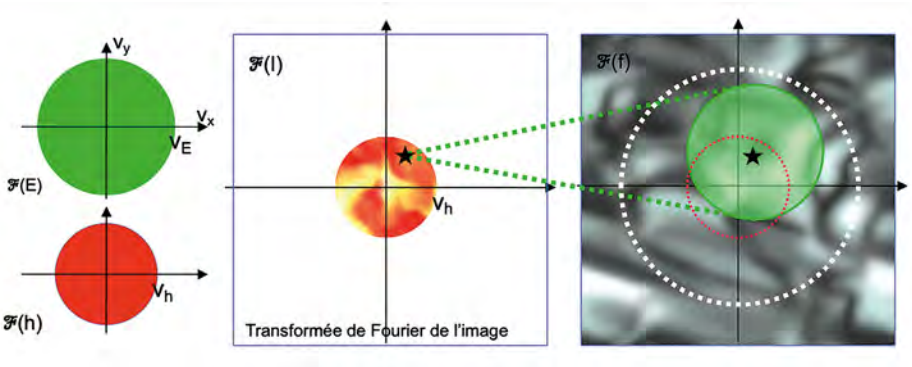


Figure 3 : La super-résolution vue dans le domaine de Fourier. À gauche, les disques verts et rouges de rayons respectifs v_E et v_h indiquent les supports en Fourier de la fonction d'excitation E et d'observation h. Au centre, la transformée de Fourier de l'image a le même support que la fonction d'observation alors que, à droite, la transformée de Fourier de l'échantillon a un support infini. La transformée de Fourier de l'image à la fréquence spatiale **v** indiqué par l'étoile, $\mathcal{F}(I)(\mathbf{v})$, est sensible aux fréquences spatiales de l'échantillon situées dans le disque vert centré en **v**. Le disque pointillé rouge indique le domaine fréquentiel de l'échantillon accessible lorsque la fonction d'excitation est homogène (disque vert réduit à un point). Le gain potentiel en résolution est indiqué par le disque pointillé blanc de rayon v_E+v_h.

Les microscopes super-résolus à éclairement périodique

La deuxième grande famille des microscopes super-résolus à porteuse déterministe, connue sous le nom de SIM (Structured Illumination Microscopy), utilise une fonction d'excitation périodique. Dans les implémentations classiques, cette dernière est obtenue en faisant interférer deux faisceaux collimatés et peut se modéliser par $E(\mathbf{r})=1+\cos(2\pi\mathbf{v}_E.\mathbf{r}+\theta)$. La transformée de Fourier de l'image prise avec un tel éclairement (Eq. 2) fait alors intervenir la somme de trois coefficients de Fourier de l'échantillon à la fréquence en **v**, $\mathbf{v}+\mathbf{v}_E$ et $\mathbf{v}-\mathbf{v}_E$,

$$\mathcal{F}[I](\mathbf{v}) = 0.5\,\mathcal{F}[h](\mathbf{v})\,\{\,e^{-i\theta}\,\mathcal{F}[f](\mathbf{v}-\mathbf{v}_E) + 2\mathcal{F}[f](\mathbf{v}) + e^{i\theta}\,\mathcal{F}[f](\mathbf{v}+\mathbf{v}_E)\,\}. \qquad (3)$$

En translatant la grille de lumière (en prenant trois angles θ différents), on obtient un système linéaire de trois équations à trois inconnues dont la résolution (numérique) permet d'estimer les trois coefficients de Fourier de l'échantillon, ($\mathcal{F}[f](\mathbf{v}-\mathbf{v}_E)$; $\mathcal{F}[f](\mathbf{v})$ et $\mathcal{F}[f](\mathbf{v}+\mathbf{v}_E)$) et ce, pour tout $v<v_h$. En tournant la grille de lumière (pour changer la direction de $\mathbf{v}_E$), on arrive ainsi à estimer la transformée de l'échantillon jusqu'à v_h+v_E, comme avec le confocal. SIM, qui est une technique d'imagerie large champ (tout l'échantillon est éclairé) a été essentiellement développée dans le régime d'excitation standard même si quelques expériences ont été menées en régime de saturation/inhibition (avec, dans ce cas, v_E significativement plus grand que $2/\lambda_E$).

Pour construire l'image super-résolue de l'échantillon, les approches de démodulation que nous venons de voir requièrent la connaissance de la 'porteuse' (le déplacement de la tache pour le confocal, et la période et position de la grille de lumière pour le SIM) ce qui nécessite des efforts expérimentaux importants pour la contrôler. Nous allons maintenant étudier les approches qui utilisent une excitation stochastique et évitent donc cette difficulté.

EXCITATION STOCHASTIQUE

Les microscopes à éclairement de speckle

Dans RIM (Random Illumination Microscopy), l'excitation de la fluorescence est obtenue en éclairant l'échantillon avec l'intensité lumineuse tavelée (speckle) d'un faisceau laser ayant traversé un diffuseur. Dans le régime standard, la fonction d'excitation E est proportionnelle à l'intensité des speckles et présente une fréquence maximale $v_E=2/\lambda_E$ comme la tache de focalisation du confocal ou la grille de lumière de SIM. Ainsi, l'image basse résolution obtenue avec un éclairement de speckle est sensible aux fréquences spatiales de l'échantillon jusqu'à v_h+v_E. L'intensité de speckle (et donc la fonction d'excitation) est inconnue mais elle obéit à des lois statistiques bien établies.

RAPPELS SUR LA TRANSFORMÉE DE FOURIER.

La transformée de Fourier d'une fonction f est définie par : $\mathcal{F}[f](\mathbf{v}) = \int f(\mathbf{r})\exp(2i\pi\mathbf{v}.\mathbf{r})d\mathbf{r}$ Le produit de convolution de deux fonctions I et k est défini par, $I\otimes k(\mathbf{r})=\int I(\mathbf{r}-\mathbf{r}')\,k(\mathbf{r}')\,d\mathbf{r}'$
La transformée de Fourier du produit de convolution de deux fonctions est égale au produit des transformées de Fourier, $\mathcal{F}[I\otimes k](\mathbf{v}) = \mathcal{F}[I](\mathbf{v}) \times \mathcal{F}[k](\mathbf{v})$.
De même, la transformée de Fourier du produit de deux fonctions est égale au produit de convolution des transformées de Fourier,
On a $\mathcal{F}[I\times k](\mathbf{v}) = \mathcal{F}[I]\otimes\mathcal{F}[k](\mathbf{v}) = \int\mathcal{F}[I](\mathbf{v}-\mathbf{v}')\mathcal{F}[k](\mathbf{v}')\,d\mathbf{v}'$.
Si $\mathcal{F}[I](\mathbf{v})=0$ pour $v>v_h$ et $\mathcal{F}[I](\mathbf{v})=0$ pour $v>v_E$ alors $\mathcal{F}[I\times k](\mathbf{v})= 0$ pour $v>v_E+v_h$. La transformée de Fourier de f^2 est égale à l'autoconvolution de la transformée de Fourier de f. Si le support de $\mathcal{F}[f]$ est un disque de rayon v_h alors le support de $\mathcal{F}[f^2]$ est un disque de rayon $2v_h$.

Elle peut être modélisée comme une fonction aléatoire spatialement corrélée de moyenne <E> constante et de covariance $\langle E(\mathbf{r})E(\mathbf{r}')\rangle-\langle E\rangle^2=C(\mathbf{r}-\mathbf{r}')$ où C, la fonction d'autocorrélation des speckles, renseigne sur la taille moyenne des tavelures. La fonction C est bien connue et est égale à h si l'éclairement est formé à travers le même objectif que celui utilisé pour l'observation de la fluorescence (et λ_E proche de λ). Le principe de RIM consiste à étudier la statistique des images enregistrées pour différentes réalisations de speckles (en faisant tourner le diffuseur par exemple). On remplace ainsi la connaissance des éclairements, nécessaire dans les techniques à porteuse déterministe, par la connaissance de la statistique des éclairements. Plus précisément, l'image super-résolue de l'objet, est reconstruite à partir de la variance des images enregistrées,

$$\mathrm{Var}(I)(\mathbf{r})=\langle I^2(\mathbf{r})\rangle-\langle I\rangle^2(\mathbf{r}).$$

On remarque que Var(I), du fait du carré de I, contient des fréquences spatiales jusqu'à $2v_h$ et qu'elle dépend de manière quadratique de l'échantillon f,

$$\mathrm{Var}(I)(\mathbf{r})=\langle I^2(\mathbf{r})\rangle-\langle I\rangle^2(\mathbf{r})=\iint h(\mathbf{r}-\mathbf{r}_1)f(\mathbf{r}_1)\,C(\mathbf{r}_1-\mathbf{r}_2)f(\mathbf{r}_2)h(\mathbf{r}-\mathbf{r}_2)d\mathbf{r}_1\,d\mathbf{r}_2. \quad (4)$$

Le point clé de RIM réside dans la démonstration mathématique que, si $v_E=v_h$, il y a une bijection entre les fréquences spatiales de la variance et celles de l'échantillon dans le disque de rayon $2v_h$. En pratique, f est estimée de manière itérative de telle sorte que la variance modèle, Eq. 3, se rapproche le plus possible de la variance expérimentale.

Les microscopes à fluorescence clignotante

Dans SOFI (Stochastic Optical Fluctuation Imaging), l'excitation des fluorophores est aussi aléatoire mais le processus n'est pas lié à la variation de l'éclairement (qui est uniforme) mais au comportement des fluorophores eux mêmes dont la tendance à clignoter a été encouragée. Dans la représentation continue de l'échantillon que nous avons choisie, cela revient à écrire que l'excitation E est formée de pics très étroits (ou pics de Dirac), placés de manière aléatoire et non corrélée de telle sorte que $C(\mathbf{r}-\mathbf{r}')=\langle E(\mathbf{r})E(\mathbf{r}')\rangle-\langle E\rangle^2=\delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}')$. Ici, le support en Fourier de E n'est pas borné ($v_E=\infty$). Comme pour RIM, on enregistre de multiples images correspondant à différentes réalisations de E et on calcule leur variance avec l'Eq. 3. Rappelant que $C(\mathbf{r}_1-\mathbf{r}_2)=\delta(\mathbf{r}_1-\mathbf{r}_2)$, l'expression se simplifie pour donner $\mathrm{Var}(I)(\mathbf{r})=\langle I^2(\mathbf{r})\rangle-\langle I\rangle^2(\mathbf{r})=\iint h^2(\mathbf{r}-\mathbf{r}_1)\,f^2(\mathbf{r}_1)d\mathbf{r}_1$. Ainsi, la variance des images basse-résolution de SOFI s'écrit comme la convolution de l'objet au carré par la fonction d'observation au carré. Elle permet donc de récupérer les fréquences spatiales de f^2 jusqu'à $2v_h$. Cependant, connaître la transformée de Fourier de f^2 jusqu'à $2v_h$ ne permet pas de connaître celle de f jusqu'à $2v_h$ (quel que soit $\mathbf{v}$, $\mathcal{F}[f^2](\mathbf{v})$ dépend de toutes les fréquences de f !). Contrairement à toutes les techniques précédemment étudiées, l'image super-résolue de SOFI ne dépend pas linéairement de f : l'image de deux objets ne correspond pas à la somme des images des objets pris séparément. Son interprétation doit alors se faire avec précaution, si possible en utilisant des informations *a priori* sur l'objet. Par exemple, si f est binaire, ne prenant que deux valeurs, 0 ou 1, $f^2=f$ et l'image de variance correspond à l'image super-résolue de l'objet.

Les microscopes à localisation

Le rôle de l'information *a priori* pour extrapoler les fréquences ● ● ●

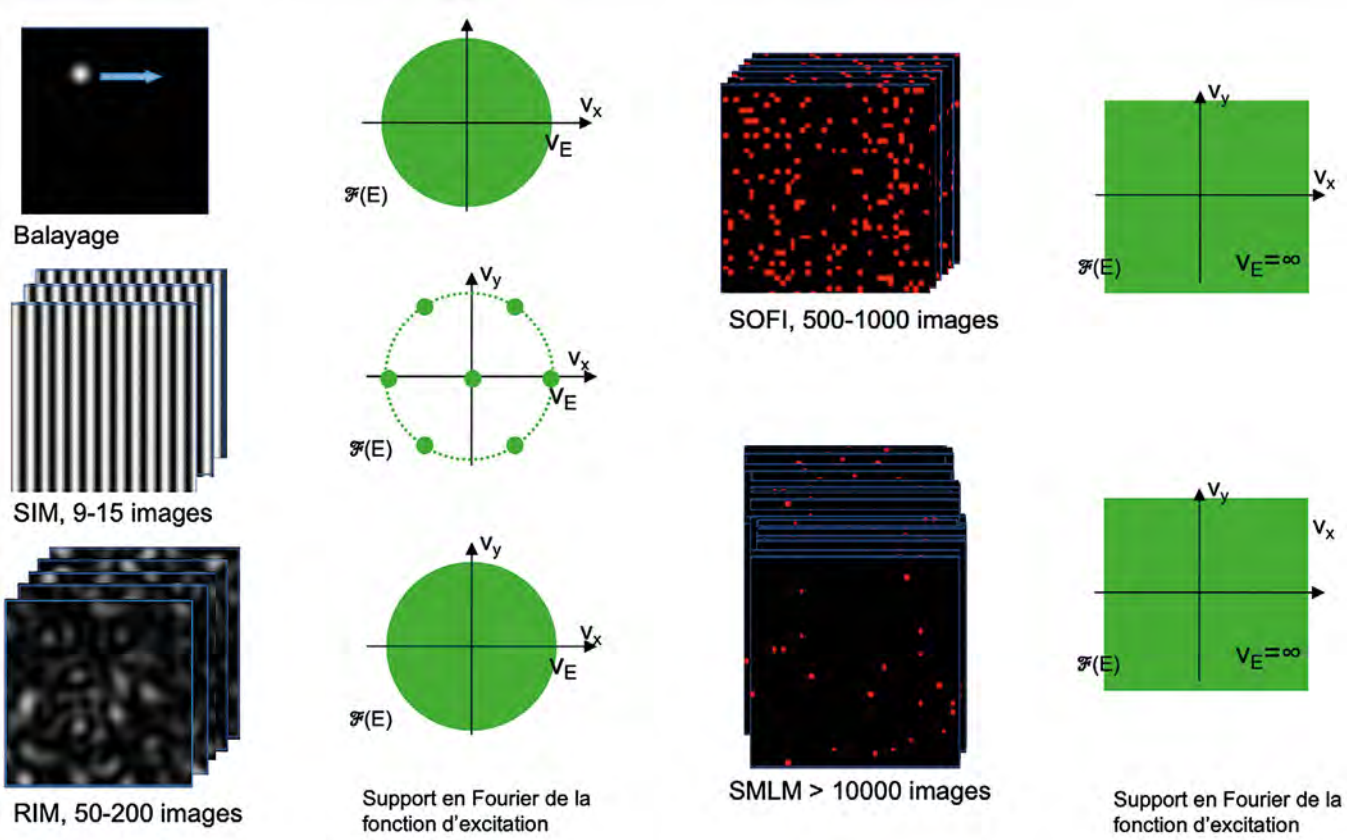


Figure 4 : Fonctions d'excitation des différentes techniques de microscopie super-résolue et leurs supports dans le domaine de Fourier. En régime de fluorescence standard, l'excitation est proportionnelle à l'intensité d'éclairement et v_E vaut $2/\lambda_E$ au mieux. Les microscopies SIM et RIM sont principalement utilisées dans le régime standard. La microscopie à balayage est utilisée dans le régime standard et le régime d'inhibition/saturation STED (dans ce cas, v_E peut atteindre $20/\lambda_E$). Les microscopies SOFI et SMLM fonctionnent dans le régime d'excitation stochastique et v_E est infini. Pour chaque technique, on a indiqué le nombre d'images basse-résolution nécessaires en pratique pour former une image super-résolue de l'échantillon.

spatiales de l'échantillon bien au-delà de v_h est à la base des méthodes SMLM (Single Molecule Localization Microscopy). Comme dans SOFI, l'excitation SMLM des fluorophores est aléatoire et décorrélée spatialement mais l'éclairement est optimisé pour que la densité des fluorophores excités soit très faible. L'excitation E est formée de pics très étroits à grande distance les uns des autres. L'image obtenue se présente comme une collection de taches que l'on suppose sans chevauchement. Le centre $\mathbf{r}_q$ et l'intensité des taches permet d'estimer $f(\mathbf{r}_q)$. En enregistrant des milliers d'images (et en supposant que <E> est une constante asymptotiquement) on peut théoriquement reconstruire f avec une précision infinie.

CONCLUSION

Nous avons vu dans cette représentation unifiée, les différentes approches qui ont été développées pour obtenir des images super-résolues d'échantillons fluorescents. Les limites théoriques de résolution qui ont été présentées sont cependant rarement atteintes. Les causes principales de détérioration des performances sont : le bruit de mesure, qui pollue particulièrement les hautes fréquences des images basse-résolution, les incertitudes sur les fonctions d'excitation déterministes (dues aux aberrations ou aux imperfections des réglages), qui entraînent des artefacts lors de la reconstruction de l'image super-résolue, et le nombre fini d'images des méthodes stochastiques qui empêche de sonder l'échantillon de manière uniforme. En pratique, si la résolution des meilleurs microscopes de fluorescence à éclairement homogène est de l'ordre de 200-300 nm, celle des microscopes super-résolus s'approche de 100-120 nm en régime d'éclairement standard (SIM et RIM) et 20-50 nm en STED ou SMLM. ●

RÉFÉRENCES

K. Prakash *et al.*, Philos. Trans. R. Soc., A **379**, 20200143 (2021)

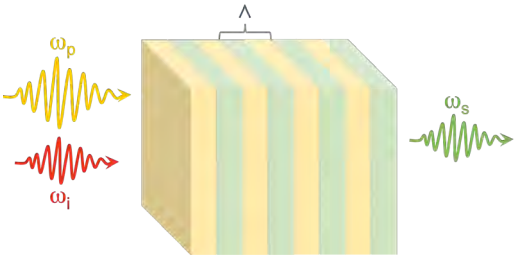
L. Schermelleh *et al.*, Nat. Cell Biol. 21, 72-84 (2019)

LA GÉNÉRATION DE SECOND-HARMONIQUE : UN DOMAINE ANCIEN ET RICHE D'AVENIR

Joseph ZYSS[1]

[1] Laboratoire Lumière, Matière et Interfaces (LuMIn) CNRS, ENS Paris-Saclay, Université Paris-Saclay, 91190 Gif-sur-Yvette

***joseph.zyss@ens-paris-saclay.fr**



La génération de second-harmonique (GSH) est le phénomène le plus connu de l'optique non-linéaire et peut-être le plus étudié jusqu'à ce jour tant en recherche fondamentale que pour ses applications. Ce domaine n'a cessé depuis de progresser et de se renouveler au rythme des progrès de l'expérimentation optique, de la théorie quantique en amont comme de la science des matériaux et en particulier des nanotechnologies, de façon à répondre aux besoins des ingénieurs et aux questionnements des physiciens.

https://doi.org/10.1051/photon/2022111451

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

La réponse linéaire d'un matériau optique résulte de la polarisation des électrons périphériques des atomes constituant, proportionnelle au champ incident pour de faibles valeurs par rapport au champ atomique. Les principaux pionniers de la GSH[1] sont Nicolas Bloembergen [1], prix Nobel de physique en 1981 et Peter Franken de l'Université du Michigan qui fit la première observation expérimentale dans le quartz en 1961. La réponse du milieu est dictée par l'émission de la polarisation induite à la fréquence incidente, moyennant un ralentissement de la vitesse de phase et une éventuelle absorption, mais sans changement de fréquence, telle que donnée par la relation $P_I^{\omega} = \chi^{\omega}_{IJ} E^{\omega}_J$ ou χ^{ω}_{IJ} est le tenseur de susceptibilité linéaire du milieu, les indices I et J parcourant les trois axes d'un repère approprié. Pour une amplitude de champ supérieure tout en respectant l'intégrité du matériau, la réponse des électrons cesse d'être élastique et cette distorsion vient ajouter des termes quadratiques, cubiques et d'ordre supérieur selon : $P_I = \chi^{(1)}_{IJ} E^{\omega}_J + \chi^{(2)}_{IJK} E^{\omega}_J E^{\omega}_K + \chi^{(3)}_{IJKL} E^{\omega}_J E^{\omega}_K E^{\omega}_L + \ldots$

Les suffixes (1), (2) et (3), désignent les susceptibilités linéaires, quadratiques et cubiques. Dans l'hypothèse simplificatrice où le champ incident est une onde plane, l'amplitude vectorielle $\vec{E}^{\omega}$ étant ●●●

[1] Les initiales SHG (pour l'anglais *Second-Harmonic Generation*) sont d'emploi plus fréquent.

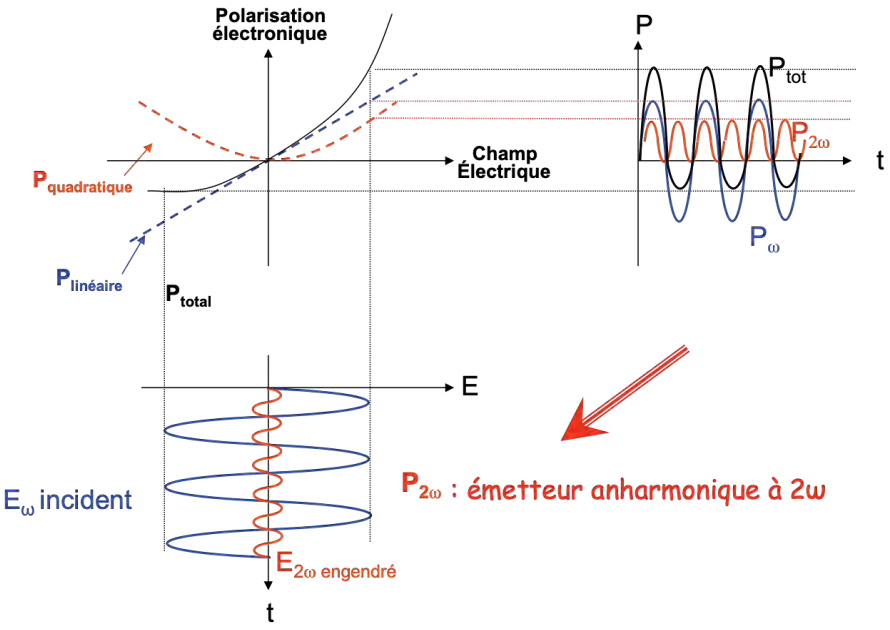
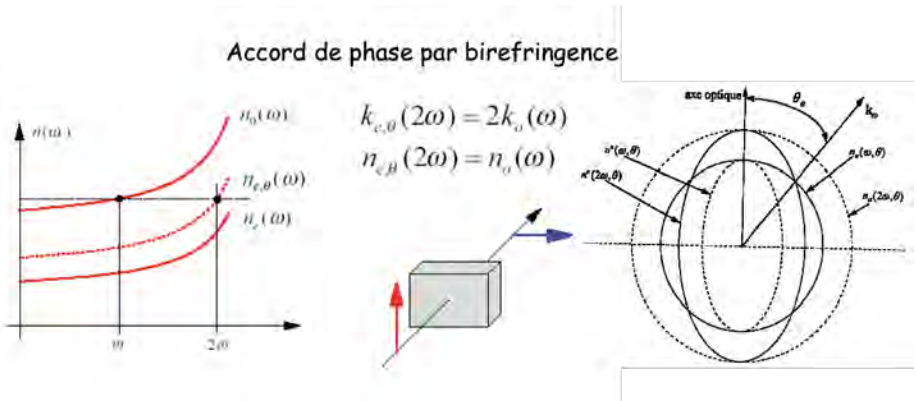


Figure 1 : modèle de la diode moléculaire pour rendre compte de la génération de second-harmonique à partir de l'asymétrie quadratique de la réponse en polarisation.

alors donnée en représentation complexe par $\vec{E}_0^{\omega} e^{j(\omega t+\vec{k}.\vec{r})}$,il est facile de voir par report dans le terme quadratique qu'il apparaît une polarisation à la fréquence 2ω double de la fréquence incidente. Celle-ci est responsable de la GSH selon la relation : $P_I^{2\omega} = \chi_{IJK}^{(2)} E_J^{\omega} E_K^{\omega}$, Le mécanisme de la génération de second-harmonique est illustré de façon phénoménologique en Figure 1 par développement de la polarisation en série de Taylor par rapport à l'amplitude du champ incident.

On trouvera en [2] et [3] des modèles microscopiques allant du formalisme classique au quantique pour rendre compte du mécanisme sous-jacent. Quelle que soit la classe de matériau, un modèle de polarisation électronique asymétrique relatif à une liaison chimique hétéro-atomique ou à une molécules conjuguée substituée par des groupements donneurs ou accepteurs d'électrons, ou encore une nanoparticule en hétérostructure polaire à base de semi-conducteurs, répondent au schéma générique de la diode moléculaire [2]. La propagation dans la direction X du rayonnement à 2ω est régie par les équations de Maxwell-Helmholtz, dont la solution générale est la somme de deux contributions satisfaisant aux conditions aux limites : une onde libre de vecteur d'onde $k^{2\omega} = \frac{2\omega n^{2\omega}}{c}$ qui est solution de l'équation homogène sans second membre et une onde forcée engendrée par le terme source de polarisation non-linéaire avec pour vecteur $2k^{\omega} = \frac{\omega n^{\omega}}{c}$. La solution générale réalise alors un battement spatial entre ces deux ondes dont l'intensité présente une période $l_c = \frac{\lambda}{4([n^{2\omega}-n^{\omega}])}$ appelée longueur de cohérence. Ces oscillations dites franges de Maker, permettent la mesure de coefficients du tenseur $\chi^{(2)}$ en modifiant la longueur de propagation. Un certain nombre d'applications exigent toutefois un taux de conversion maximum en GSH, ce qui passe par la mise en phase de l'onde libre et de l'onde forcée (cf. Fig.2). On peut réaliser cette condition en égalisant les indices de réfraction aux longueurs d'onde fondamentale et harmonique, soit $n^{2\omega} = n^{\omega}$ qui n'est autre que la conservation du moment des photons $2\hbar k^{\omega} = \hbar k^{2\omega}$ au travers de la disparition de deux photons à la fréquence fondamentale donnant naissance au photon harmonique. Toutefois, la dispersion en fréquence de l'indice de réfraction impose en général une croissance de l'indice de réfraction de l'infra-rouge au visible qui exclut cette condition. L'anisotropie éventuelle du milieu peut permettre de compenser l'effet de la dispersion pour un choix d'une direction de propagation et de polarisation incidente adaptées comme illustré en Fig.2. Une autre configuration d'accord de phase qui s'est généralisée pour les applications depuis les années 90, consiste à inverser avec une périodicité égale à une demi

Figure 2 : accord de phase par biréfringence et quasi-accord de phase par inversion périodique de domaine dans un polymère ou un matériau ferroélectrique tel que le Niobate de Lithium



longueur de cohérence le signe du tenseur quadratique, par exemple le coefficient $\chi^{(2)}_{xxx}$ dans le cas d'un cristal ferroélectrique d'axe polaire X par inversion de domaines en alternant un champ coercitif. Cette alternance compense l'interférence destructive au long de la deuxième demi-longueur de cohérence. On aboutit alors à une GSH cumulative qui croit linéairement au long du parcours. Une condition *sine qua non* reste dans tous les cas l'existence d'un tenseur $\chi^{(2)}_{IJK}$ présentant au moins un coefficient non-nul. Il est facile de montrer qu'une condition générale assurant l'existence d'un tenseur spatial de rang trois non nul est que le milieu soit non-centrosymétrique, ce qui revient à interdire l'existence de tout centre de symétrie qui laisserait le milieu invariant par inversion. Cette contrainte s'applique aux deux échelles de la GSH, l'une relative à l'entité nanométrique qui en est la source et l'autre à l'empilement macroscopique de ces entités vu comme un réseau de nano-antennes aux phases relatives mutuellement cohérentes. Un tel empilement est de nature périodique dans les milieux cristallins tels que certains diélectriques et les semi-conducteurs ou statistique pour les liquides, polymères, les verres ou les tissus biologiques. Cette double exigence fait l'intérêt mais aussi la difficulté de l'optique non-linéaire quadratique, qui contraste avec les effets cubiques pour lesquels le tenseur de rang 4 sous-jacent est toujours non-nul. Le paysage des matériaux de l'optique non-linéaire quadratique apparait plus contrasté et relie de façon plus nette les propriétés géométriques structurelles du milieu à ses propriétés quadratiques alors que l'optique non-linéaire cubique est plus plate de ce point de vue[2] et moins structurellement signifiante. La GSH est ainsi devenue un outil de sonde structurelle et électronique d'utilisation courante en science des matériaux.

L'image la plus simple d'un milieu quadratique est celle de dipôles attachés à des molécules ou à des liaisons chimiques hétéro-atomiques selon un axe z prédominant, ces entités dipolaires étant à leur tour orientées selon un même axe Z macroscopique idéalement parallèle à z. Une telle géométrie assure la sommation intégrale des dipôles sources sans pondération par des coefficients angulaires. Un facteur de désordre statistique partiel, par exemple une distribution conique d'angle aléatoire θ autour d'un axe macroscopique Z et présentant une valeur moyenne $\langle(\cos\theta)^3\rangle$ non nulle à empérature ambiante peut toutefois être un prix à payer acceptable pour bénéficier d'un matériau modelable en couches minces ou en guides d'onde susceptibles de maintenir les conditions de la GSH ● ● ●

[2] Par contre les effets cubiques ont conduit à des configurations spectroscopiques originales du plus grand intérêt pour l'étude des mécanismes vibrationnels, sous les nom de spectroscopie CARS par exemple (pour Coherent Anti-Stokes Raman Scattering).

PUBLI-RÉDACTIONNEL

L'Imagerie SHG outil prometteur pour l'étude des matériaux 2D

C. DAVID[1,2], M. Tchaya[1], T. Dieng[1], O. Hollricher[1]

[1] WITec GmbH, Lise-Meitner-Str. 6, 89081 Ulm, Germany

[2] Oxford Instruments SAS, 77, ZA de Montvoisin, 91400 Gometz la Ville, FRANCE

La microscopie basée sur la génération de seconde harmonique (SHG) est une technique d'imagerie prometteuse pour l'investigation des échantillons structurés tels que les dichalcogénures de métaux de transition (TMDs).
La SHG est un processus optique non-linéaire dans lequel deux photons interagissent simultanément avec la matière et se convertissent en un photon unique. L'énergie ainsi générée, est utilisée pour obtenir des images contrastées basées sur les propriétés intrinsèques de l'échantillon.
Seule ou en corrélation avec d'autres techniques optiques, telles que, la microscopie Raman et/ou la photoluminescence (PL), la SHG est un outil puissant, capable de détecter des changements d'orientation et de symétrie des cristaux.
Nous présentons dans ce paragraphe un exemple d'analyse multimodale SHG, Raman et PL pour l'étude des monocouches de disulfure de molybdène (MoS2). L'ensemble des mesures ont été réalisées sur la même région de l'échantillon, avec le microscope WITec alpha300 confocal. Une excitation, continue à 532 nm a été utilisée pour les imageries Raman et PL et une excitation pulsée à 1064 nm (régime picoseconde) pour la génération du signal SHG.
Des mesures SHG en fonction de la polarisation de l'excitation ont permis d'identifier l'orientation du cristal et ont mis en évidence différentes zones de stress et de déformation de l'échantillon.
L'imagerie SHG fournit des informations complémentaires aux mesures Raman et PL. Elle permet une investigation complète à l'échelle micrométrique de la structure des cristaux TMDs sans endommager l'échantillon. ●

Pour en savoir plus : https://raman.oxinst.com/

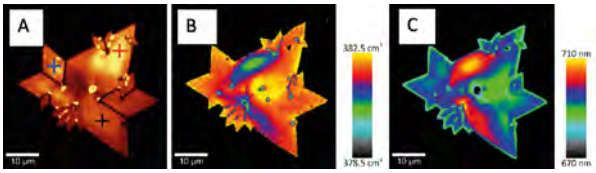


Figure 1 : Imagerie multimodale SHG (A), Raman (B) et PL (C) d'une monocouche de MoS2

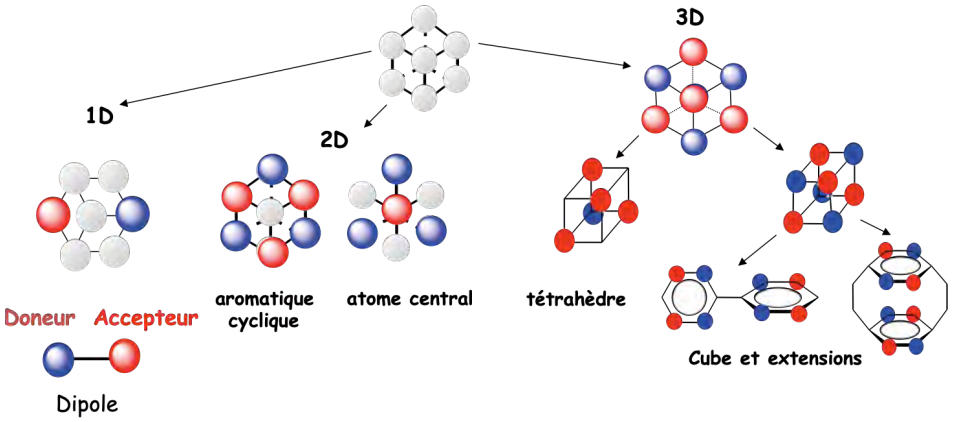


Figure 3 : Modèles bi- et tridimensionnels de brisure de centro-symétrie respectant la contrainte d'un dipôle nul qui structurent l'ingénierie moléculaire de molécules et matériaux octupolaires

sur des distances millimétriques ou plus. Les polymères illustrent ce potentiel en tant que milieu amorphe susceptible de donner facilement des couches minces parfaitement calibrées par centrifugation qui se prêtent à l'incorporation de molécules non-linéaires orientables sous champ électrique à une température voisine de la transition visqueuse. Un schéma de ce type, connu sous les initiales EFISH (pour *Electric Field Induced SHG*), est en outre applicable à des solutions liquides, permettant la mesure des propriétés non-linéaires de molécules ou encore de nanoparticules [3]. Un domaine important de l'optique non-linéaire est la spectroscopie non-linéaire, qui ouvre une fenêtre plus large sur les états excités d'entités non-linéaires. En effet, en spectroscopie classique et en régime dipolaire électrique, les couplages entre états de parités différentes de type pair-impair sont seuls permis, ce qui limite l'accès à une partie seulement des états excités. La GSH en milieu non centré s'affranchit de cette restriction en autorisant le couplage entre mêmes états par transitions mono- et bi-photonique. Dans ce contexte, un modèle quantique à deux états [6] a orienté les recherches initiales vers des entités moléculaires absorbant dans le visible ou le proche UV et présentant une différence de dipôle élevée entre l'état fondamental et le premier état électronique excité.

La famille des colorants à transfert de charge répond à ce cahier des charges avec des substituants accepteurs et donneurs d'électrons qui asymétrisent conjointement la polarisation des électrons intermédiaires. Une telle géométrie dipolaire donc vectorielle, pour intuitive et répandue qu'elle soit, n'est toutefois aucunement nécessaire et aura longtemps occulté le riche potentiel des structures permises en GSH. En effet, une ingénierie moléculaire plus générale [4] a été développée sur la base de la décomposition générale de tout tenseur symétrique de rang trois en deux composantes irréductibles respectivement dipolaire et octupolaire, ouvrant à la famille des matériaux octupolaires dépourvus de dipôles, par exemple à symétrie ternaire ou tétraédrique (voir Fig.3). À son tour, l'absence de dipôles associés aux structures octupolaires a stimulé la recherche d'alternatives à l'orientation par champ électrique interdite ici par l'annulation du dipôle permanent propre à ces structures. Une méthode alternative d'orientation dite « tout optique » a ainsi été développée [5]. Elle ne met en œuvre que des champs optiques au travers d'une interférence entre rayonnements incidents à ω et 2ω de nature à briser la centro-symétrie initiale du milieu amorphe irradié au travers de transitions dipolaires couplant des états quantiques, sans nécessité de recourir à un dipôle permanent. Le grand potentiel de cette méthode n'a sans doute pas été suffisamment exploité à ce jour. Plusieurs configurations importantes font exception à l'exigence de non-centro-symétrie. L'une d'elles est la diffusion harmonique de la lumière, également découverte par P.D. Maker, qui étend la diffusion Rayleigh à l'ordre quadratique [3]. Son caractère incohérent aboutit à considérer des amplitudes de champ élevées au carré dont la somme est non nulle, contrairement à la sommation des amplitudes vectorielles d'un champ cohérent en milieu centrosymétrique. D'autre part, le couplage quadrupolaire qui est exprimé par un tenseur impliquant le gradient spatial du champ incident, dont le rang 4, donc pair, n'impose pas de brisure de symétrie. Signalons enfin la GSH émise par des surfaces ou interfaces entre deux milieux centro-symétriques ou non. La brisure de centro-symétrie résultant de la différence de nature entre les deux milieux de part et d'autre de l'interface génère un second-harmonique caractéristique de cette interface. Une spectroscopie non-linéaire de surfaces, éventuellement sensible aux spectres de vibration infra-rouge d'espèces déposées en surface, s'est imposée comme outil de caractérisation *in situ* en croissance cristalline. Ces deux derniers effets, respectivement quadrupolaire et surfacique, se conjuguent dans les nanostructures métalliques donnant

lieu à une GSH d'origine plasmonique. Par leur nature hybride, à la fois électrons et photons, les plasmons ne sont pas soumis à la limite de diffraction et permettent de coupler les échelles microniques de l'optique et nanométriques de l'électronique, d'où leur considérable essor actuel.

D'autres phénomènes non-linéaires quadratiques sont reliés à la GSH qui est un cas particulier d'un phénomène plus général de mélange à trois ondes, où deux rayonnements aux fréquences ω_1 et ω_2 généralement dans l'infra-rouge, se combinent pour engendrer un rayonnement aux fréquences somme et différence $\omega_1 \pm \omega_2$ respectivement dans le visible et le plus lointain infra-rouge. Lorsque les deux longueurs d'onde sont suffisamment proches l'une de l'autre, la différence de fréquences permet ainsi d'émettre en régime cohérent dans le domaine des THz, une zone spectrale critique pour la spectroscopie et les applications. Lorsque l'une des deux fréquences est dans le spectre des radiofréquences, le rayonnement optique se trouve modulé par un tel champ appliqué au travers d'électrodes adaptées. Une des applications majeures de cet effet électro-optique aussi appelé effet Pockels est la modulation à haute fréquence d'une source laser continue pour les télécommunications optiques, universellement mise en œuvre dans des composants fonctionnant à des fréquences atteignant la centaine de GHz dans des guides optiques en Niobate de Lithium.

Les phénomènes précédents peuvent être vus comme la « fusion » de deux photons pour pour en générer un troisième. Un mécanisme inverse possible est la « fission » cohérente d'un photon incident engendrant deux photons jumeaux de plus basse énergie par dissociation paramétrique. Un tel effet est soumis à un seuil qui est plus facilement atteint par allers-retours multiples dans une cavité Fabry-Pérot aux miroirs réfléchissant à des fréquences appropriées.

Les fréquences de ces émissions complémentaires sont susceptibles de varier continûment par modification de l'orientation du cristal non-linéaire émetteur, les longueurs d'onde satisfaisant à une condition d'accord de phase dépendant de cette orientation. Ce type de dispositif est d'usage courant dans les laboratoires de spectroscopie comme sources cohérentes accordables sur un large spectre du proche UV à l'IR. Par ailleurs, les émetteurs paramétriques jouent un rôle crucial dans les études d'intrication et de cryptographie quantiques où ils sont devenus les sources privilégiées pour l'émission de paires de photons jumeaux gardant la mémoire de leur corrélation initiale une fois séparés, aux fins d'étudier des phénomènes d'intrication quantique à distance. Enfin, les matériaux de l'optique non-linéaire ont grandement bénéficié de l'émergence des nanotechnologies, avec la mise en œuvre, et le design d'entités nanométriques présentant des caractéristiques non-linéaires nouvelles et se prêtant à des fonctions de marquage nanométriques qui ont trouvé un vaste débouché dans l'étude des matériaux biologiques. La microscopie de GSH (*cf.* Fig.4) éventuellement associée au marquage spécifique des tissus par des nanoparticules, a ainsi ouvert un champ nouveau à l'imagerie de cellules et de tissus biologiques avec une précision submicronique remarquable ● ● ●

La microscopie de GSH éventuellement associée au marquage spécifique des tissus par des nanoparticules, a ainsi ouvert un champ nouveau à l'imagerie de cellules et de tissus biologiques avec une précision submicronique remarquable

LASER COMPONENTS
Infrared Detectors
We Manufacture All Technologies
★★★★★
[x-] InGaAs
★★★★★
PbS/PbSe
★★★★★
DLaTGS
★★★★★
$LiTaO_3$
5.000 clients liked this!
www.lasercomponents.fr

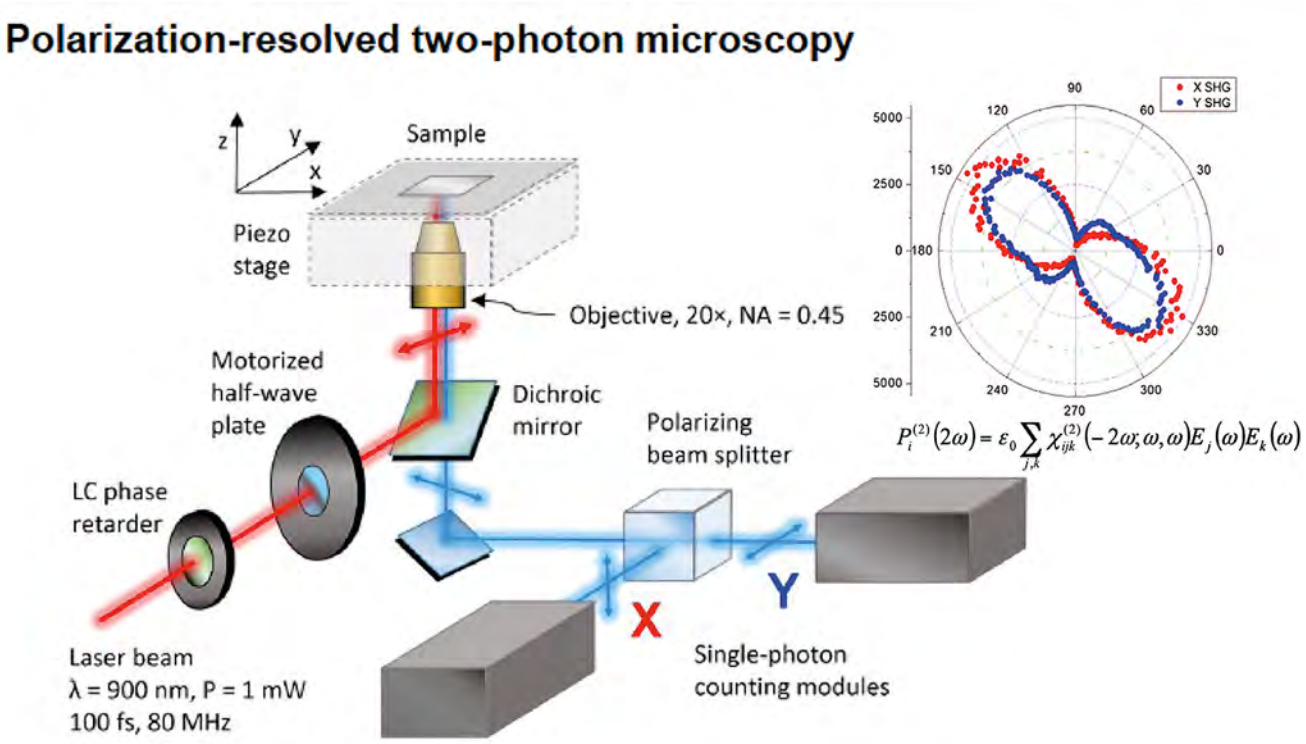


Figure 4 : Bâti de microscope confocale pour la génération de second-harmonique et plus généralement les effets à deux-photons. La résolution en polarisation permet une caractérisation structurelle précieuse à un niveau submicronique, ici des nanobatonnets à base de semiconducteurs dispersés aléatoirement en milieu solide. Le système est auto-focalisant compte tenu du caractère local de la GSH qui n'est émise à un niveau significatif que dans une région micronique autour du foyer, contrairement à la fluorescence, ce qui simplifie considérablement le dispositif.

[7]. Des informations supplémentaires peuvent être déduites d'une telle imagerie en lumière polarisée qui permet d'aboutir à des diagrammes polarimétriques (*cf.* Fig.4) riches d'informations sur la configuration des tissus et organes biologiques comme sur les nano-objets individuels.

Pour conclure, s'il fallait définir un défi à la pointe actuelle du domaine justifiant des efforts pour aboutir dans un délai raisonnable, il pourrait s'agir d'un composant nanométrique émetteur de paires de photons jumeaux uniques intégrant une source laser et un émetteur paramétrique dans un boitier micronique lui-même connecté à une fibre optique. Un tel composant serait amené à jouer un rôle-clé au sein d'un réseau de communication quantique crypté, mettant également en œuvre des modulateurs électro-optiques pour le routage et la distribution de l'information. À ce titre comme beaucoup d'autres, les recherches sur la GSH et les effets associés resteront plus que jamais d'actualité à l'avenir. Elles concernent un large champ pluridisciplinaire allant de l'imagerie biologique jusqu'aux systèmes de communication et de calcul quantiques en passant par l'élaboration de matériaux multifonctionnels de plus en plus « intelligents ».

Les contributions de physiciens, chimistes, biologistes et ingénieurs trouveront plus que jamais à s'y exercer conjointement aux meilleurs niveaux de leurs disciplines.

RÉFÉRENCES

[1] N.Bloembergen, Nonlinear Optics, *World Scientific* (1964)

[2] D. S. Chemla and J. Zyss (eds.), *Nonlinear Optical Properties of Organic Molecules and Crystals*, Academic, New York, 1987, Vols. 1 and 2.

[3] J Zyss, I Ledoux, Chem. Rev. **94**, 77 (1994)

[4] J. L. Oudar and D.S.Chemla, . Chem. Phys. **67**, 446 (1977)

[5] J. Zyss, J. Chem. Phys. **98**, 6583 (1993)

[6] S. Brasselet and J. Zyss, J. Opt. Soc. Am. B **257**, 15 (1998)

[7] S. Brasselet, Adv. Opt. Phot. 3, 205–271 (2011)

ACHETER DES FIBRES OPTIQUES POUR LA SPECTROSCOPIE

Patrice LE BOUDEC*,[1]

[1]IDIL Fibres Optiques, 4 rue Louis de Broglie, 22300 LANNION

***patrice.leboudec@idil.fr**

https://doi.org/10.1051/photon/202211457

Les fibres optiques sont de plus en plus utilisées dans des applications autres que les télécommunications. La spectroscopie est l'un des domaines où les fibres deviennent de plus en plus indispensables entre autres pour la fabrication de sondes permettant de déporter les points de mesures.

Les bandes de longueur d'onde d'intérêt sont larges, allant de 200 nm à l'infra-rouge moyen vers 5 µm voire plus. Les fibres silice transmettent la lumière entre 200 nm et un peu plus de 2200 nm. Pour les longueurs d'onde supérieures, il faudra utiliser des fibres en verre fluoré ou en verre de chalcogénures. Mais le matériau n'est pas le seul paramètre à prendre en compte. Le diamètre, l'ouverture numérique ainsi que la gaine devront être définis afin de s'adapter au mieux à l'application.

L'UTILISATION DES FIBRES OPTIQUES POUR LA SPECTROSCOPIE

Le développement de petits spectromètres fibrés a accéléré le développement de cette méthode d'analyse qui est aujourd'hui de plus en plus •••

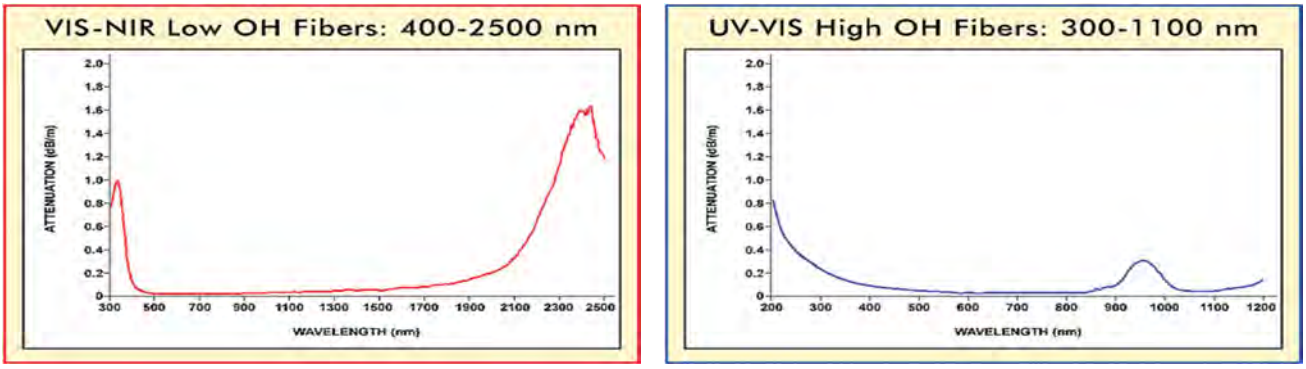


Figure 1 : Atténuation d'une fibre low-OH et High-OH (crédit Ocean Insight)

utilisée, que ce soit au laboratoire ou dans l'industrie. Le gros avantage tient au fait qu'il est possible de séparer la partie analyse de la lumière de l'endroit où doit se faire la mesure. Il est ainsi possible de capter la lumière dans une toute petite zone, comme dans le cerveau d'un rat ou dans un mini-réacteur chimique et de l'analyser dans une zone plus accessible. Les fibres permettent également de s'affranchir de nombreux réglages des chemins optiques nécessaires pour amener la lumière dans les systèmes d'analyse. Cela permet par exemple de réaliser des systèmes de mesure transportables comme un sac à dos contenant une lampe d'excitation, un spectromètre miniature, une batterie, un ordinateur et une sonde optique pour analyser la photosynthèse dans une forêt d'Amazonie. Des sondes à fibres optiques peuvent aussi être insérées dans une aiguille pour rentrer dans de la matière. On peut alors mesurer la quantité de gras dans de la viande, ou la qualité nutritionnelle de fourrages.

Certaines fibres peuvent résister à certains milieux très agressifs : température, rayonnement ou milieux chimiques. On peut donc capter la lumière dans ces milieux et la déporter vers l'appareil de mesure qui sera en zone sans contrainte.

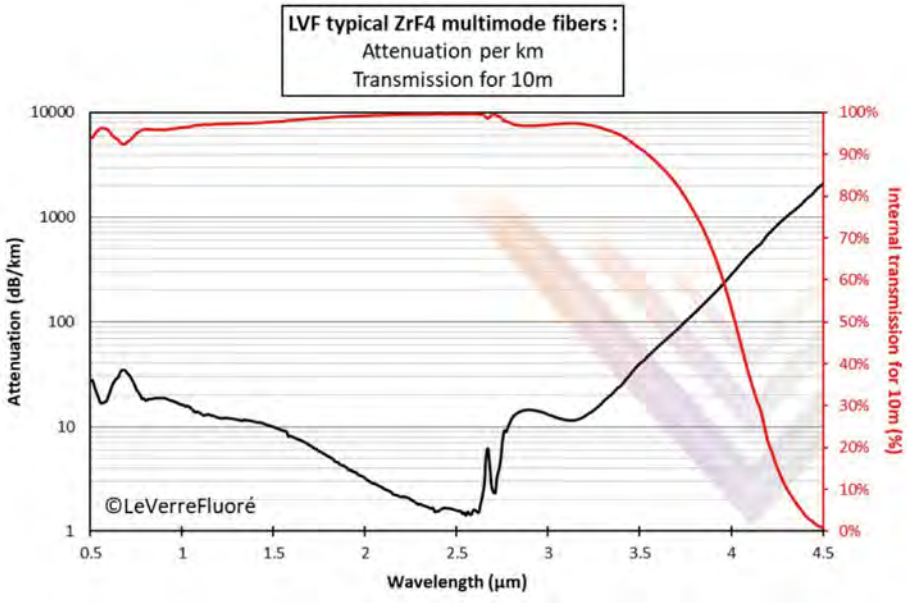
LES ASPECTS GÉOMÉTRIQUES

Les premiers paramètres à définir sont le diamètre de cœur et l'ouverture numérique. En effet, suivant le schéma d'expérience souhaité, il sera possible d'optimiser grandement le rendement. Il faudra faire attention aux deux côtés de la fibre : le système optique qui capte la lumière devra être pensé afin de récupérer un maximum de photons et uniquement ceux d'intérêt. De même la taille de la fibre devra être en regard de celle du détecteur : ce n'est pas la peine d'avoir un diamètre de cœur de 600 µm pour un détecteur de diamètre 10 µm ! On l'aura compris, le choix de ces paramètres sera un compromis à trouver pour optimiser la quantité de lumière qui arrivera sur le système de détection.

Un point est à souligner : le produit surface du cœur par l'ouverture numérique sera une constante pour le système d'injection. On ne pourra donc capter de la lumière sur une très grande surface que dans une petite ouverture numérique. Ainsi, récupérer la lumière diffusée par une surface étendue dans une fibre de diamètre 10 µm aura un rendement extrêmement faible. Une relecture assidue des cours de photométrie sera indispensable pour éviter des déconvenues !

Les fibres existantes ont des diamètres de cœur allant de quelques microns à 1 voire 2 mm. Si l'on a besoin de grosses fibres, il faudra prendre en compte la rigidité du

Figure 2 : Atténuation d'une fibre en verre fluoré (crédit Le Verre Fluoré)



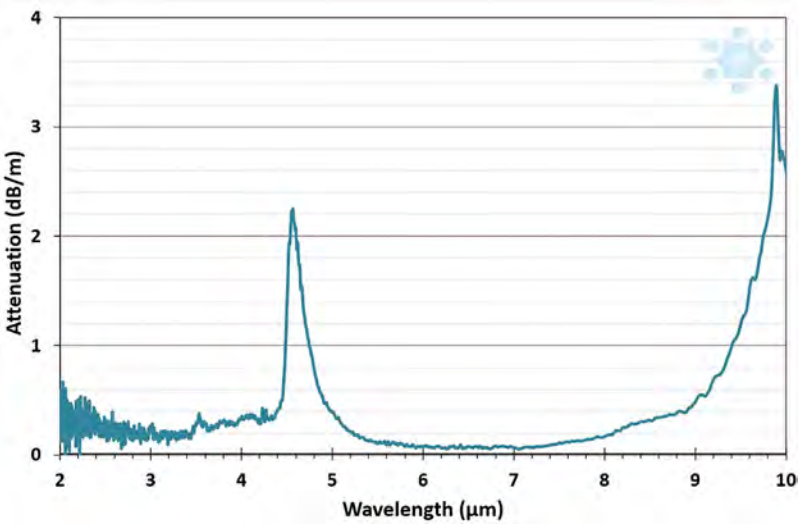


Figure 3 : Atténuation d'une fibre de verre chalcogénure (crédit SelenOptics)

verre qui pourra devenir problématique à partir de 400µm. On pourra alors préférer un assemblage de fibres plus petites (bundle) afin de conserver de la souplesse.

QUELLE FIBRE POUR LES DIFFÉRENTES LONGUEURS D'ONDE

La bande de longueurs d'onde d'intérêt devra être étudiée avec soin. Pour les longueurs d'onde dans le visible et proche infra-rouge, la silice « low-OH » sera parfaitement adaptée : de 450 nm à 1700 nm, l'atténuation est inférieure à 0.2 dB/m (inférieure à 0.1 dB/m de 480 nm à 1300 nm).

Les fibres High-OH seront quant à elles adaptées pour l'ultra-violet jusqu'à 200 nm (0.8 dB/m à 200 nm).

Il faut cependant noter que ces fibres seront susceptibles de noircir lorsqu'on injectera de l'ultra-violet. Il faudra alors utiliser des fibres solarisées. Ces fibres ont été préalablement insolées avec de l'UV. Leur transmission est alors légèrement moins bonne, mais elle sera stable dans le temps.

La silice transmet la lumière jusque 2000/2200 nm. Au-delà, il existe d'autres matériaux. Pour la bande 2000/4500 nm, on pourra utiliser des fibres en verre fluoré. Un grand nombre de diamètres est disponible sur le marché. Ces fibres sont cependant plus fragiles, il est donc conseillé de les utiliser en câble déjà assemblés et connectorisés. Elles servent par exemple beaucoup ● ● ●

La silice transmet la lumière jusque 2000/2200 nm. Au-delà, il existe d'autres matériaux. Pour la bande 2000/4500 nm, on pourra utiliser des fibres en verre fluoré. Un grand nombre de diamètres est disponible sur le marché. Ces fibres sont cependant plus fragiles, il est donc conseillé de les utiliser en câble déjà assemblés et connectorisés. Elles servent par exemple beaucoup en astronomie pour coupler les télescopes aux instruments de mesure.

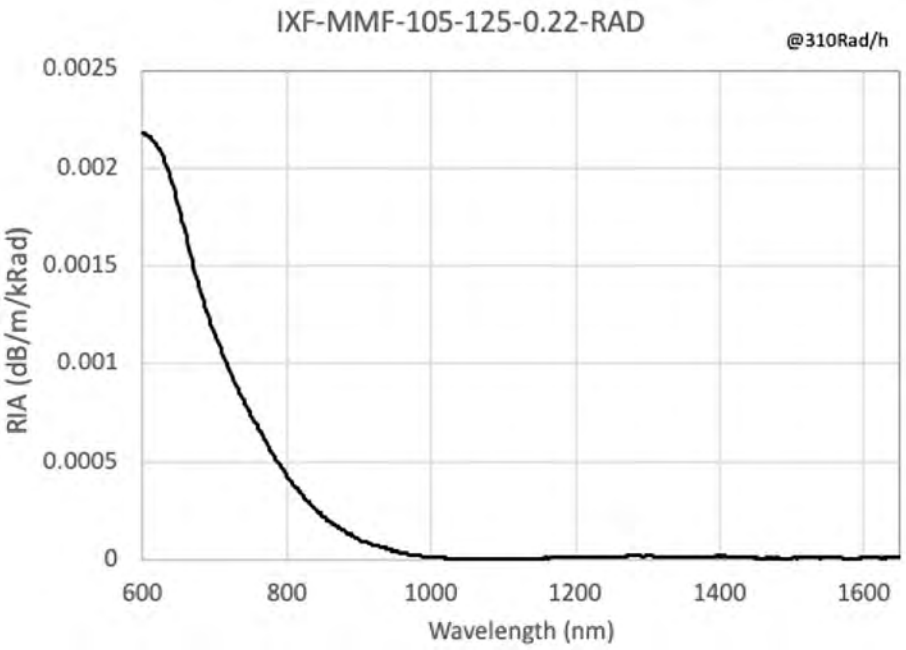


Figure 4 : augmentation de l'atténuation d'une fibre soumise aux radiations (crédit Ixblue)

en astronomie pour coupler les télescopes aux instruments de mesure. Pour travailler à plus de 4500 nm, des fibres à base de matériaux chalcogénures ont été développées il y a quelques années. Elles sont maintenant disponibles commercialement.

De nouvelles technologies de fibres commencent à être disponibles. Il s'agit des fibres micro-structurées et en particulier les fibres hollow-core. Le cœur de ces fibres est constitué d'air et les bandes de transmission sont alors importantes jusque dans l'infra-rouge moyen. Il est également possible d'injecter du gaz dans le cœur pour en faire des cellules d'absorption.

LES CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES

Pour conserver les propriétés mécaniques des fibres, il est nécessaire de les protéger car la silice se dégrade rapidement au contact de l'eau. Si elles ont une très bonne tenue en température, ce n'est pas forcément le cas des gaines qui les protègent. Le matériau le plus classique est le polymère. Malheureusement il ne résiste qu'à des températures allant de -40°C à 80°C. Au-delà, il se dégrade rapidement et perd ses qualités de protection. On peut alors utiliser du polyimide qui sera efficace jusqu'à 350 °C. Pour des températures encore plus élevées, on pourra utiliser des gaines métalliques de type aluminium ou cuivre. Le métal est déposé directement sur la fibre lors du fibrage. La température utilisable pourra alors monter aux alentours de 1000°C. La présence de rayonnement ionisant induira à terme un noircissement plus ou moins rapide de la silice. Il sera alors nécessaire de se fournir en fibres résistantes aux radiations.

CONCLUSION

Le panel de fibres optique disponibles est presque aussi large que celui des applications. Une analyse fine des longueurs d'onde d'intérêt, de la géométrie de l'expérience, des contraintes de courbures, de température ou la présence de radiations devra être faite afin de se prémunir des mauvaises surprises.

FABRICANT	DISTRIBUTEUR	TYPES DE FIBRES
	FRANCE	
Ixblue		Fibres silice / Rad-Hard
IDIL Fibres Optiques		Fibres silice / Fabrication de sondes pour la spectroscopie
Glo Photonics		Fibres hollow core
Le Verre Fluoré		Fibres en verre fluoré
Photonics Bretagne		Fibres spéciales / Fibres Micro-structurées / coating métallique
SelenOptics		Fibres Chalcogénures
	ÉTRANGER	
Ceramoptec	OBS Fiber	Fibres silice
Coherent / Nufern		Fibre silice / Environnement sévère
FiberGuide	AMS Technologies	Fibre silice
Leoni		Fibre silice / spéciales

Laser CO_2 1W

Ce laser CO_2 compact d'Access Laser fournit un faisceau laser de 1W sur une seule raie d'émission, longueur d'onde sélectionnable entre 9.2µm et 10.7µm. Il combine les fonctionnalités technologiques telles que le Line Tracker et l'accordabilité par réseau pour fournir une puissance élevée et une excellente stabilité de longueur d'onde. Son nouveau contrôleur, driver et logiciel, rend sa configuration et son fonctionnement très faciles.
https://www.optonlaser.com/laser/nouveau-laser-co$_2$-1w-de-precision-monoraie-slx
https://www.accesslaser.com

CAMÉRA MULTISPECTRALE SNAPSHOT POUR LE SWIR

La nouvelle caméra hyperspectrale ANT de Silios est une caméra légère (120 g) et de très faible encombrement (46.5x46.5x32.5 mm) qui divise l'image en 9 bandes spectrales sur la gamme SWIR (1100-1700 nm). Réalisée par intégration d'un filtre mosaïque sur mesure de type Bayer sur un capteur InGaAs commercial, elle permet d'extraire le spectre en chaque point de l'image.
https://www.silios.com/ant-camera

Source NIR ultracourte pour l'imagerie à 3 photons

Le laser Monaco 1300 de Coherent est une source ultra-rapide de 1300 nm dédiée à l'imagerie à 3 photons qui délivre des impulsions de 1,5 à 2,5 W, inférieures à 50 fs à 1300 nm dans le régime MHz. L'accès à la sortie Monaco 1035 nm permet également des applications avancées en photostimulation et en imagerie à deux photons, le tout à partir d'une seule source d'excitation.
https://www.coherent.com/content/dam/coherent/site/en/resources/datasheet/lasers/monaco-1300-ds.pdf

CAPTEUR MODULAIRE POUR LASER HAUTE PUISSANCE

Le capteur Ophir IPM-10KW mesure les puissances dans la plage 100 W à 11 kW pour les longueurs d'onde de 900 à 1100 nm et 10,6 µm.
Ce capteur a été développé aussi bien pour les constructeurs de lignes de soudure et de découpe laser que pour leurs utilisateurs.
Il est constitué de composants modulaires qui peuvent être assemblés individuellement selon l'application visée.
https://www.ophiropt.com/laser--measurement/laserpower-energy-meters/products/industrial-power-meter

Caméra infrarouge

La caméra infrarouge VTC 2400 d'Instrument Systems a été développée spécifiquement pour l'analyse en champ lointain des émetteurs IR et conçue pour être utilisée à la fois en laboratoire et en environnement de production. Elle est recommandée pour l'analyse des applications VCSEL, telles que la détection 3D dans les smartphones ou les systèmes LiDAR dans l'industrie automobile. .
https://www.instrumentsystems.com/en/products/imaging-colorimeters-ir-testing-cameras/vtc-2400

Des technologies performantes qui transforment notre monde

MKS est un leader mondial de la photonique connu sous nos marques Spectra-Physics, Newport et Ophir. Dans nos locaux français de Beaune-La-Rolande (Loiret) et de Brigueuil (Charente), nous concevons et fabriquons des solutions de mouvement de précision de pointe pour servir les semi-conducteurs, l'électronique de pointe et les marchés industriels du monde entier.

MKS poursuit sa croissance et continue d'investir en France. Micro-Contrôle ouvre ainsi 70 nouveaux emplois à pourvoir dans les deux prochaines années sur ses deux sites. Cette initiative est reconnue et soutenue par le gouvernement français dans le cadre de « France Relance ».

Vous souhaitez rejoindre MKS ?
Veuillez contacter notre équipe française de recrutement de talents pour plus d'informations au **+33 2 38 40 50 70** ou consultez notre site Web **www.mks.com.**

FRANCE RELANCE

mks | Newport™ | Ophir® | Spectra-Physics®