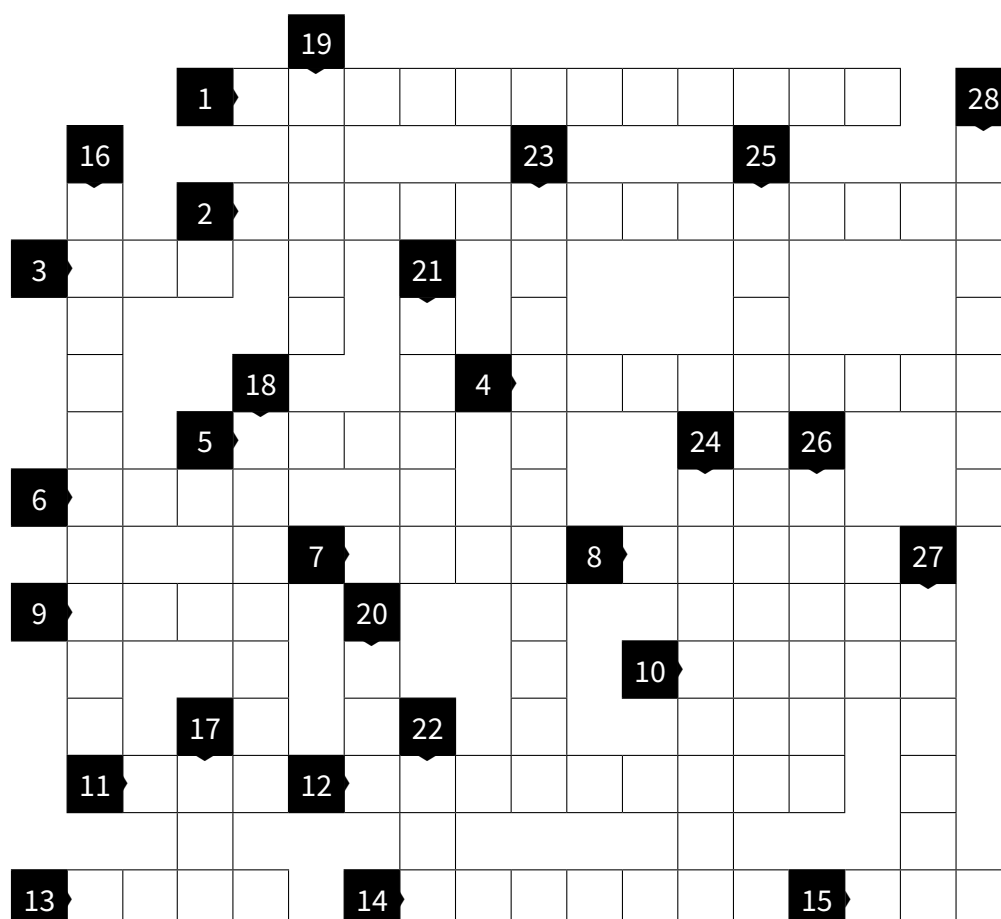


MOTS CROISÉS

SUR LE THÈME DE LA SPECTROSCOPIE OPTIQUE

Par Philippe ADAM



SOLUTION SUR
PHOTONIQUES.COM



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

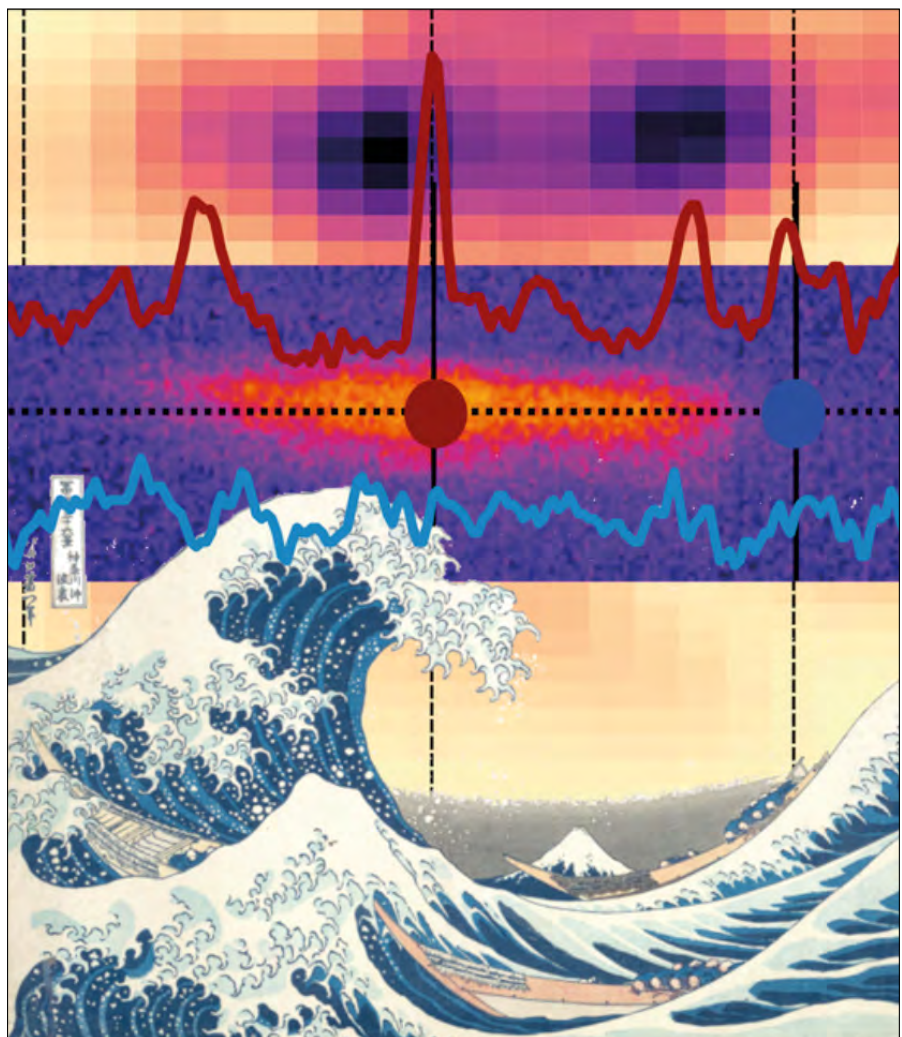
Prévision d'événements extrêmes à l'aide d'informations partielles dans un microlaser spatio-temporellement chaotique

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

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

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

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



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

souvent rencontrée dans les systèmes naturels et expérimentaux. ●

POUR EN SAVOIR PLUS

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

Les lasers pour un backbone internet par satellite

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

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

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

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



Illustration: © ETH Zurich / Enea Ingellis

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

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

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

POUR EN SAVOIR PLUS

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



Entretien avec Nicolas Forget

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

VOTRE PARCOURS DÉMONTRE UN TRÈS FORT ATTRAIT POUR LA RECHERCHE

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

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

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

QUELLES ONT ÉTÉ VOS ACTIVITÉS DANS L'ENTREPRISE ?

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

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

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

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

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

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

QUELS SONT LES PRINCIPAUX DÉFIS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES À RELEVER ?

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

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

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

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

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

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

CONSERVEZ-VOUS DES LIENS AVEC LE MILIEU INDUSTRIEL ?

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