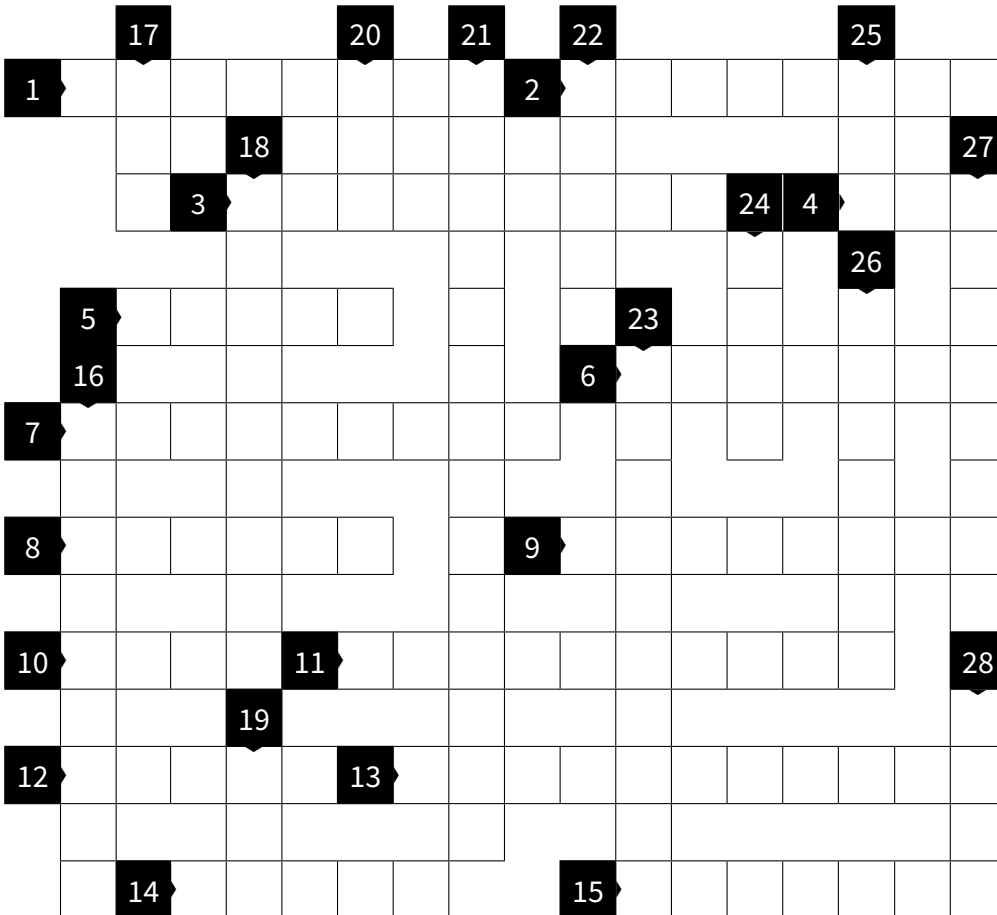


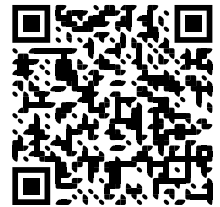
MOTS CROISÉS

SUR LE THÈME DE L'IMAGERIE HYPERSPECTRALE

Par Philippe ADAM



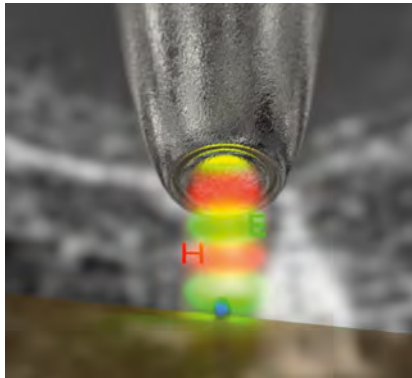
SOLUTION SUR
PHOTONIQUES.COM



- | | |
|---|---|
| <p>1 Fument... avec brio !</p> <p>2 Inventeur d'une méthode de photographie interférentielle, Prix Nobel de physique de 1908</p> <p>3 Tel un prisme par exemple</p> <p>4 Méthode de régression partielle par les moindres carrés</p> <p>5 Capteur VIS/NIR embarqué australien, utilisé au milieu des années 1990</p> <p>6 Indicateurs phytoplanctoniques télémesurables</p> <p>7 Situation critique pour les sols, les eaux et l'atmosphère</p> <p>8 Réparti dans plusieurs bandes dans un imageur hyperspectral</p> <p>9 Données de base acquises par un système hyperspectral</p> <p>10 Générés en très grandes quantité pour une image hyperspectrale</p> <p>11 Suite d'instructions informatiques pour traiter des données acquises</p> <p>12 Organisme de recherche français actif dans le domaine de l'imagerie hyperspectrale</p> <p>13 Aberrations atmosphériques brouillant les données acquises</p> <p>14 Technique CCD à multiplication d'électrons</p> <p>15 SYstème Spectro-Imageur de mesure des Propriétés Hyperspectrales Embarqué pour applications Défense et développé par l'ONERA</p> | <p>16 Balayage transverse d'une image pendant le déplacement du porteur</p> <p>17 Airborne Imaging Spectrometer</p> <p>18 Technique d'extraction des spectres des matériaux purs et de leur abondance</p> <p>19 Si on n'y prend pas garde, se sature par le flot de données</p> <p>20 Hyperspectral Imaging System</p> <p>21 Nom générique pour les caméras effectuant des mesures dans de nombreux canaux spectraux</p> <p>22 Une des départements de l'Observatoire de Paris</p> <p>23 Qualifie les observations par imagerie hyperspectrale pour les espèces marines</p> <p>24 Organisme utilisateur d'imagerie hyperspectrale pour la détection des fuites de CO₂</p> <p>25 Analyse en Composantes Principales</p> <p>26 Etat de surface mesurable à distance par imagerie hyperspectrale</p> <p>27 Nouvelle famille de missions d'observation de la Terre de l'ESA</p> <p>28 Institut français engagé dans la surveillance des contaminations végétales</p> |
|---|---|

Manipulation des interactions entre les parties électriques et magnétiques de la lumière et de la matière

Les interactions entre la lumière et la matière sont souvent considérées comme étant le fait unique-ment de la composante électrique d'une onde optique. Pour autant, la lumière est constituée d'un champ électrique, mais également d'un champ magnétique, et l'interaction avec cette composante magnétique joue un rôle déterminant dans de nombreux processus physiques. Parmi ces processus, on peut citer le dichroïsme circulaire, qui permet l'observation et la



détection de molécules chirales biologiques telles que les protéines, ainsi que des produits issus de l'industrie pharmaceutique. On peut mentionner également les technologies quantiques basées sur les terres rares qui utilisent des transitions magnétiques pour la génération de qubits, par exemple.

Cependant, l'étude du couplage entre le champ magnétique optique et la matière présente des défis en raison de la difficulté de séparer spatialement ce champ magnétique du champ électrique, ainsi que de la faiblesse intrinsèque de ces interactions. Une équipe du laboratoire INSP (Sorbonne Université, CNRS) associée avec Chime ParisTech et l'institut Langevin (Université PSL, CNRS), a récemment développé un nanosystème pour séparer spatialement les composantes électriques et magnétiques de la lumière, de manière à étudier spécifiquement le couplage entre ces composantes et une nanoparticule de matière.

Les chercheurs ont développé une approche novatrice en utilisant un nanomiroir en aluminium fixé à l'extrémité d'une pointe de microscope champ proche. Cette technique leur permet de contrôler précisément la position 3D du nanomiroir à l'échelle nanométrique. En exploitant ce dernier, ils ont créé une onde stationnaire dans laquelle les champs électriques et magnétiques ne se superposent pas spatialement. En ajustant de manière précise la répartition et la position spatiale des champs optiques, les chercheurs ont pu étudier spécifiquement leurs interactions avec un nano émetteur quantique composé d'oxyde d'yttrium dopé aux ions europium trivalent, situé sous le miroir.

Cette étude a révélé que l'émetteur quantique pouvait se coupler au champ magnétique optique, absorbant ainsi une partie de l'énergie portée par cette composante de la lumière, la nanosource libérant par la suite cette énergie sous forme de photon grâce à un processus de luminescence. De plus, en effectuant la même démarche avec le champ électrique et en déplaçant l'émetteur quantique dans l'onde stationnaire, il a été possible de résoudre la répartition spatiale des lobes magnétiques et électriques, cartographiant ainsi la distribution tridimensionnelle des interférences lumineuses électriques et magnétiques. Enfin, les chercheurs ont démontré que leur nanosystème ne manipulait pas seulement l'excitation de l'émetteur quantique, mais également son émission en changeant l'environnement quantique qui l'en-toure, démontrant ainsi le contrôle de l'ensemble des interactions lumière-matière. ●

POUR EN SAVOIR PLUS

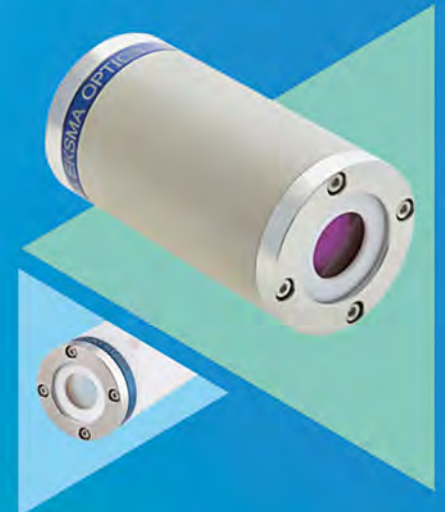
B. Reynier, E. Charron, O. Markovic et al., "Full control of electric and magnetic light-matter interactions through a nanomirror on a near-field tip," *Optica* **10**, 841 (2023).
<https://doi.org/10.1364/OPTICA.486207>

Cellule de Pockels BBO

- Taux de répétition > 2 MHz
- Transmission > 98%
- Contraste VCR > 1:1000
- Puissance moyenne pour lasers ultra-rapides > 100 W

Applications

- Selection d'impulsions ou train d'impulsions
- Injection/extraction de pulse dans amplificateur régénératif
- Q-switching
- Modulation de laser CW



Represented by

ARDOP

INDUSTRIE

05.40.25.05.36

sales@ardop.com

www.ardop.com



www.eksmaoptics.com

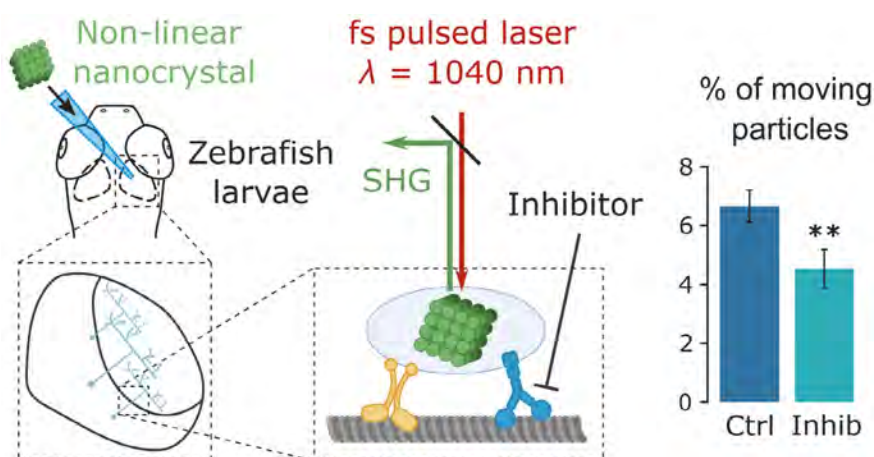
Étude quantitative *in vivo* du transport axonal dans le cerveau de larves de poisson zèbre grâce au suivi de nanocristaux en microscopie optique non-linéaire à haute résolution spatiotemporelle

Des anomalies du transport moléculaire intraneuronale sont observées dans les maladies neurodégénératives déclarées. Il est suspecté qu'elles puissent apparaître à un stade pré-clinique, pouvant ainsi permettre un diagnostic précoce. Cependant, il n'existe pas de méthodes sensibles permettant de détecter ces perturbations, notamment dans un organisme intègre et vivant.

Une équipe du laboratoire LuMIn (ENS Paris-Saclay, CNRS, CentraleSupélec et Université Paris-Saclay) s'est associée à l'unité de IERP de l'INRAE pour développer une méthode de vidéo-microscopie non-linéaire, permettant le suivi et la mesure fine du transport axonal de compartiments endo-lysosomaux dans le cerveau de larves de poisson zèbre.

Les équipes ont marqué ces compartiments à l'aide de nanocristaux de phosphate de titane et de potassium (taille ≈ 100 nm) possédant une forte réponse optique non-linéaire (synthétisés au Laboratoire de Physique de la Matière Condensée, École Polytechnique). Pour ce faire elles ont injecté les nanocristaux dans le toit optique des larves, où ils sont ensuite endocytés spontanément dans les axones des neurones périventriculaires. La méthode de mesure du transport axonal consiste alors à enregistrer le signal de génération de second harmonique (SHG) des nanocristaux par microscopie à balayage rapide à l'aide d'un microscope à deux photons commercial équipé d'un scanner galvanométrique résonnant. À la différence des stratégies s'appuyant sur le suivi de marqueurs fluorescents, la SHG ne photoblanchit pas et possède un spectre étroit (≈ 10 nm) permettant d'obtenir un rapport signal/fond élevé même à une cadence de 20 champs de $\approx 100 \times 100$ μm balayés par seconde.

Ces performances, associées aux propriétés de transparence optique de la larve de poisson zèbre ont été notamment exploitées pour mesurer des paramètres du transport axonal dans la lignée transgénique mutante d'un moteur moléculaire



Mesure du transport axonal par microscopie non-linéaire. Des nanocristaux (cubes verts) à réponse optique non-linéaire sont micro-injectés dans le cerveau de larves de poisson zèbre (à gauche). Ils sont spontanément internalisés dans des endosomes (au centre) dont ils servent à suivre le transport dirigé assuré par des moteurs moléculaires (kinésine en jaune et dynéine en bleue) le long des microtubules (gris). En présence d'un inhibiteur de la dynéine, la fraction d'endosomes mobiles diminue (droite). La méthode permet de mesurer de nombreux autres paramètres de transport.

kinésine (Kif5aa) développée par une équipe de l'Institut de la Vision (Paris). La précision de cette nouvelle méthode de mesure de transport axonal a permis de révéler des anomalies indétectables par une approche conventionnelle d'imagerie de protéines fluorescentes.

Ces travaux ont été publiés dans la revue *ACS Nano* de la société américaine de chimie.

Le pipeline MINT d'extraction automatique des paramètres de transport axonal à partir des données brutes de vidéo-microscopie a été développé à cette occasion pour faciliter l'analyse d'un grand nombre de données.

La méthode mise au point servira à étudier les liens entre défauts de transport axonal

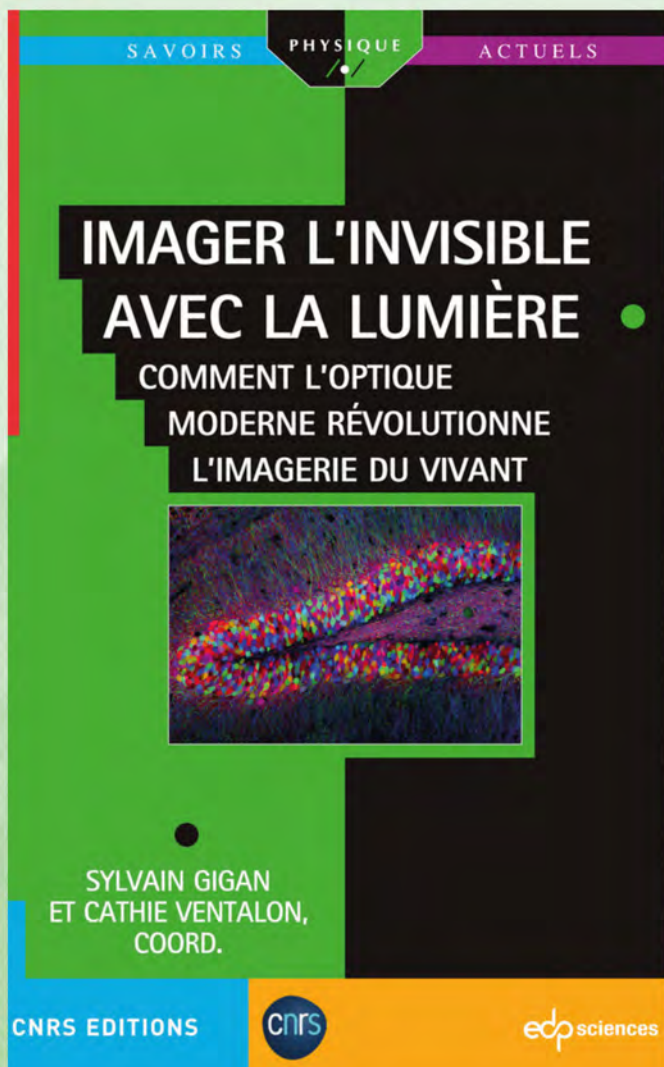
et dysfonctions neuronales *in vivo*. Dans ce contexte, le poisson zèbre permet de développer des modèles biomédicaux d'intérêt de telles dysfonctions (maladies neurodégénératives, infections cérébrales, vieillissement...), dans lesquels il est possible de cribler des principes actifs thérapeutiques. ●

CONTACTS :

francois.treussart@ens-paris-saclay.fr (LuMIn, ENS Paris-Saclay, CNRS, CentraleSupélec, Gif-sur-Yvette), christelle.langevin@inrae.fr (IERP, INRAE, Jouy-en-Josas) et baptiste.grimaud@ens-paris-saclay.fr (LuMIn) pour le programme MINT.

Comment l'optique moderne révolutionne l'imagerie du vivant

VIENT DE
paraître



COORDONNÉ ET ÉCRIT PAR
**CATHIE VENTALON ET
SYLVAIN GIGAN**



Disponible aussi en format e-book
En vente sur laboutique.edpsciences.fr

ISBN : 978-2-7598-2654-4
140 pages illustrées
Prix : 22 €

Notre œil est un outil exceptionnel qui reste néanmoins limité en résolution et en sensibilité. Même avec les appareils traditionnels de l'optique, comme les microscopes, il n'est pas possible de pénétrer les environnements complexes. Les nouveaux instruments, en particulier les lasers, ont permis des avancées considérables, notamment dans le domaine de la médecine.

Le livre présente de manière accessible les concepts physiques en jeu et montre que nous avons aujourd'hui des outils permettant de répondre à des questions fascinantes : comment fonctionne notre cerveau, neurone par neurone ? Peut-on détecter précocement un cancer ou des maladies de la rétine ?

Cathie Ventalon est chercheuse CNRS à l'institut de biologie de l'École normale supérieure. Elle développe de nouvelles méthodes optiques pour les neurosciences, dans le but d'étudier le lien entre l'activité neuronale et les comportements, la mémoire ou la perception sensorielle.

Sylvain Gigan est professeur à Sorbonne Université et chercheur au Département de Physique de l'École normale supérieure. Il travaille sur la propagation de la lumière, en particulier pour l'imagerie, dans les milieux complexes et biologiques.





Entretien avec Pascale Senellart

Photoniques s'entretient avec Pascale Senellart, directrice de recherche au CNRS, médaille d'argent CNRS, élue en 2022 à l'Académie des Sciences et co-fondatrice de l'entreprise Quandela.

COMMENT EST NÉE VOTRE VOCATION POUR LA PHYSIQUE ?

Entre le domicile de mes parents et celui de mes grands-parents se trouvait la station de radioastronomie de Nançay. Cette station me faisait rêver lorsque nous passions devant et j'ai souhaité y réaliser mon stage de 3°. C'est ainsi que j'ai passé une semaine immergée dans ce laboratoire où j'ai été accueillie d'une manière incroyable. J'étais très curieuse, je posais beaucoup de questions et j'ai pu visiter tous les coins de la station. Devant mon enthousiasme, l'équipe m'a alors proposé de revenir quand je le souhaitais. Et j'y suis retournée une vacance sur 2 les 5 années qui ont suivi ! L'environnement me plaisait et j'ai ainsi tout de suite su que je voulais travailler dans le monde de la recherche. En 1^{ère}, mes parents étaient dans une situation financière difficile et mon professeur de mathématiques m'a incitée à présenter un dossier pour « La bourse de la vocation scientifique féminine » de la région Centre (10000 francs par an pendant 4 ans). J'ai été la lauréate de cette bourse ce qui m'a permis de poursuivre mes études à Paris et d'intégrer la prépa Louis Le Grand.

VOUS AVEZ ENSUITE DÉCOUVERT LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

J'ai eu le déclic pour la mécanique quantique lors d'un oral du concours d'entrée à l'ENS Lyon où mes 2 examinateurs m'ont demandé de réfléchir à l'expérience des fentes d'Young et de faire le lien avec les inégalités d'Heisenberg. Cet échange fut riche et a nourri mon intérêt pour la mécanique quantique. Si j'ai finalement préféré intégrer

l'école Polytechnique, cet oral aura lancé ma vocation pour la mécanique quantique. Je n'ai jamais regretté le choix de l'X (à part le service militaire !) ; j'ai eu la chance d'avoir des professeurs très enthousiasmants qui nous ont fait découvrir la mécanique quantique, Jean-Louis Basdevant, Alain Aspect ou encore Claude Weibusch avec son cours sur les semi-conducteurs. Ce cours m'a d'ailleurs convaincue de m'orienter vers une thèse sur les semi-conducteurs, et plus précisément sur les polaritons. Il s'agissait d'une thèse très fondamentale dont l'objectif était de prouver que les excitons ont les propriétés des bosons. Je travaillais notamment avec Jacqueline Bloch qui est aujourd'hui internationalement reconnue pour ses travaux dans ce domaine. Cette période était très intense, le sujet connaissait de vifs débats scientifiques. J'ai eu en parallèle mon premier enfant durant la thèse et était enceinte de mon deuxième enfant à la fin de ma thèse. Je me sentais fatiguée et je souhaitais changer de sujet. Ces circonstances ont fait que j'ai finalement opté pour un post-doc de 9 mois en entreprise, chez Schlumberger, pour travailler sur la détection de gaz par spectroscopie infrarouge. J'ai beaucoup apprécié le travail dans une équipe « projet » où chacun apporte une expertise bien spécifique. Mais souhaitant tout de même à terme intégrer le CNRS, et ayant échoué lors de ma première audition au concours CNRS, il me fallait revenir vers un parcours académique. C'est pourquoi j'ai fait un ATER au MPQ, dans le groupe de Vincent Berger. J'ai découvert l'activité d'enseignement mais je trouvais difficile de lancer une ligne de recherche en même temps... J'ai alors pensé rejoindre le monde de l'entreprise mais

j'ai tenté le concours CNRS une seconde fois avec le LPN (aujourd'hui C2N), et j'ai été prise.

VOUS AVEZ ALORS PU VOUS CONCENTRER SUR VOTRE PROJET DE RECHERCHE

Oui, j'ai dédié mon temps à la réalisation de mon projet de recherche que j'avais imaginé et écrit pour intégrer le CNRS. Ce projet portait sur l'intégration de boîtes quantiques dans des cavités optiques. J'ai retrouvé Jacqueline Bloch. Nous avons toutes les deux des enfants en bas âge. Nous nous sommes épaulées et notre soutien mutuel nous a beaucoup apporté.

COMMENT AVEZ-VOUS IMAGINÉ CETTE APPROCHE SI NOUVELLE POUR INSÉRER DES BOÎTES QUANTIQUES EN CAVITÉ ?

Pour mettre en cavité des boîtes quantiques, je dirais que nous jouions aux dés comme tout le monde. Par cette méthode empirique, nous avons produit un échantillon qui marchait bien et avec lequel nous avons obtenu le premier couplage fort. Ces résultats ont été publiés en 2005 dans la revue Phys. Rev. Lett. Mais manque de chance, nous avons cassé l'échantillon qui nous avait permis d'obtenir ces résultats et malgré tous nos efforts, nous ne parvenions pas à le reproduire. J'étais alors convaincue que nous ne pouvions pas poursuivre ainsi. L'idée qui a changé la suite de l'histoire m'est venue en septembre 2005 à la conférence OECS. J'ai eu l'occasion de visiter une équipe de recherche à l'université de Southampton qui possédait une technique de lithographie directe par laser. Je connaissais la lithographie par projection par masque mais

cette équipe travaillait avec des lasers UV focalisés dans l'échantillon. Je me suis dit que c'est ce que je devais faire mais à température cryogénique (4°K). Mais devant l'ampleur de la tâche qui m'attendait pour y parvenir, j'en ai discuté avec Paul Voisin, notre animateur d'équipe et sa réaction a été très positive: il m'a pleinement soutenue en me disant que si je ne prenais pas le temps maintenant d'explorer ce type d'idées « farfelues », je ne le prendrais jamais. Je réalise aujourd'hui la chance que j'ai eue de pouvoir travailler dans de telles conditions. Je me suis concentrée 18 mois pour développer cette approche et casser ce verrou afin d'aller plus loin dans le contrôle de l'interaction entre la lumière et la matière.

ET QUEL ÉTAIT LE PRINCIPE DE CETTE NOUVELLE APPROCHE ?

Le principe consiste à repérer optiquement la position d'une boîte quantique au sein d'un empilement planaire. La structure initiale consiste en une couche contenant les boîtes quantiques disposées aléatoirement, avec des empilements diélectriques réfléchissants en haut et en bas de cette couche d'émetteurs. Je dépose sur l'empilement une résine photosensible et je refroidis le tout à 4°K. Puis j'excite avec un laser et je fais de la spectroscopie pour recueillir l'émission des boîtes. Le spot laser présente une taille caractéristique d'un micron alors que les boîtes quantiques ne font que 30 nm. Mais comme l'objet au bord du faisceau laser reçoit une intensité plus faible que lorsqu'il est au centre, je peux mesurer la position de l'émetteur avec une résolution nanométrique. Je peux mesurer très précisément la position de mon émetteur. Lorsqu'il est au centre du premier laser, j'allume un second laser superposé au premier pour insoler la résine et définir la cavité optique centrée sur l'émetteur. Cette approche me permettait de dessiner la cavité optique par photolithographie centrée sur la boîte quantique avec une seule étape de lithographie. Ce travail nous a permis de démontrer la fabrication déterministe d'un émetteur quantique en cavité.

QUELLES ONT ÉTÉ LES GRANDES ÉTAPES DE VOS RECHERCHES ?

Je souhaitais en fait obtenir des émetteurs à base de semi-conducteurs aussi propres que des atomes uniques en contrôlant la dynamique d'émission et le diagramme de rayonnement. Nous avons publié les résultats issus de cette nouvelle technique de lithographie optique en 2008. C'est le papier que j'ai eu le plus de mal à publier, mais un de ceux qui auront le plus d'impact sur la suite de nos activités. A partir de là, tout a changé car nous parvenions à réduire la sensibilité de l'émetteur à son environnement.

Nous avons commencé à susciter l'intérêt de la communauté de l'optique quantique.

En 2010, nous avons publié une première en montrant une source de photons intriqués très brillante. Cet article a été publié très facilement dans la revue Nature. En 2013, nous avons publié des résultats sur une source de photons uniques qui détient toujours le record de brillance. C'est à cette époque que j'ai commencé à être invitée à des conférences d'optique quantique. J'ai mieux compris ce dont les chercheurs qui développent les technologies quantiques ont besoin. Il leur fallait des sources de photons uniques très brillantes, oui, mais aussi très indiscernables. J'ai alors eu la chance d'être soutenue et motivée par un grand nom du domaine, Pr Andrew White de l'université du Queensland en Australie, qui est un des fondateurs du calcul quantique optique. Il est venu me rendre visite et m'a expliqué pourquoi notre approche était si importante pour le domaine, et nous a tracé la voie pour la suite. Les années 2013-2016 ont été consacrées à l'amélioration du contrôle sur nos composants, notamment en ajoutant un contrôle électrique pour réduire le bruit de charge. En 2016, nous avons produit des photons indiscernables. Ce nouveau résultat a marqué un nouveau tournant très important car ce résultat démontre la compatibilité de notre approche avec les technologies quantiques.

COMMENT ET POURQUOI AVEZ-VOUS CRÉÉ L'ENTREPRISE QUANDELA ?

Nous avons observé un engouement très fort autour de nos sources de photons uniques indiscernables et c'est là que Niccolo Somaschi, post-doctorant de l'équipe a proposé de créer une entreprise pour commercialiser nos sources. J'ai contacté Khaled Karrai que je connaissais bien et qui avait créé Attocube, pour avoir son avis sur ce projet. Khaled nous a fortement encouragés et nous a donné des conseils très précieux. Valérian Giesz, doctorant de l'équipe, possédait lui en plus de son pedigree scientifique une expérience dans le management de par son expérience associative, menée en parallèle à sa thèse. Nous nous sommes réunis tous les 3 et avons décidé de lancer une start-up basée sur notre technologie. Nous sommes alors fin 2015. Nous avons pris une année et demi pour nous former à l'entrepreneuriat, monter des dossiers de financements (programme de pré-maturation du CNRS, de valorisation de l'université Paris Saclay) et tester la reproductibilité de notre technologie. Il faut réaliser qu'à l'époque très peu d'entreprises étaient créées autour des technologies quantiques, notre projet apparaissait très étrange à beaucoup d'acteurs de la valorisation en France. Nous avons créé Quandela en 2017 et vendu nos premières sources juste après.

CETTE PÉRIODE CORRESPOND À L'ÉMERGENCE DES GRANDS PROGRAMMES AUTOUR DU QUANTIQUE

Nous avons commencé comme une boîte de fournisseurs de composants de sources de photons uniques. Il s'agissait d'un petit marché disruptif mais le quantique a alors changé de dynamique avec le lancement des programmes européens, américains et chinois. En 2020, nous avons décidé de nous lancer dans la construction d'un ordinateur quantique basé sur nos photons uniques. Nous avons alors recruté Shane Mansfield, spécialiste d'algorithmique quantique. Il a su agréger une équipe autour de lui. La première levée de fonds a été réalisée en 2021 pour un montant de 10 millions d'€. L'entreprise a alors connu

une très forte croissance : d'une quinzaine d'employés en 2021, nous sommes passés à 70 employés début 2023. Nous avons maintenant toutes les compétences, du composant semi-conducteur, aux modules optiques au software et à l'algorithmique quantique. C'est une formidable équipe qui s'est lancée le défi de mettre un premier ordinateur quantique sur le cloud et l'a réussi fin 2022 avec 6 qubits. La collaboration avec le CNRS prend aussi de l'ampleur car l'avenir de la technologie dépend très fortement de la recherche fondamentale dans mon équipe. C'est pourquoi nous sommes en train de finaliser un laboratoire commun CNRS/Quandela. Il y a une boucle de rétroaction très positive entre mon équipe de recherche académique et Quandela, car nous bénéficions dans mon équipe de tous les progrès technologiques réalisés chez Quandela. Il y a maintenant 13 personnes qui travaillent à temps plein sur la fabrication des composants et nous pouvons mener au CNRS des expériences que très peu de groupes peuvent réaliser grâce à la qualité de ces sources quantiques.

VOUS AVEZ ÉTÉ TRÈS IMPLIQUÉE DANS LE DÉPLOIEMENT DU PLAN QUANTIQUE

Mes activités de recherche se sont toujours situées à l'interface entre plusieurs domaines scientifiques de la physique. Je fais de la physique atomique avec de la matière condensée, je développe de la technologie pour de la physique fondamentale... Même si cet aspect a parfois été un frein au cours de ma carrière, c'est aussi un atout. Le président de l'université Paris Saclay m'a demandé en 2018 de piloter un groupe de travail réfléchissant à la pertinence de créer une structure quantique à Saclay. L'Europe lançait son plan quantique mais il ne se passait rien au niveau national. Nous avions à Saclay beaucoup de groupes travaillant dans ces domaines, mais chacun dans son silo. Je sentais qu'il y avait quelque chose à faire pour mettre en synergie toutes ces communautés et surmonter quelques passifs. J'ai reçu plusieurs lettres de mission afin de développer ce projet. La présidente de l'université Paris-Saclay, Sylvie Retailleau, a

reconduit ma mission. On a ainsi pu inaugurer le centre quantique fin 2019 qui fut l'un des premiers projets transversaux de la nouvelle université. Il m'a ensuite été demandé d'intégrer la task-force du gouvernement pour représenter les universités dans la définition de la feuille de route du plan quantique.

Nous avons travaillé avec une dizaine de personnes sur la définition du plan quantique, identifier nos forces et nos faiblesses, mais aussi définir les grands projets à soutenir et discuter des budgets. Dans le cadre de Quantum Saclay, je me suis également impliquée dans une réflexion sur la restructuration des programmes d'enseignement. J'enseignais depuis 2014 à l'école Polytechnique mais je n'avais jamais participé à la création de nouvelles filières et le défi d'adapter les filières de formations aux nouveaux enjeux du quantique est passionnant. Sur Saclay, nous avons mené plusieurs actions : création du master 2 Quantum Light Materiel and Nanosciences (QLMN) qui nous a permis de doubler le nombre d'étudiants en restructurant 2 anciens master 2.

Avec Jean-Francois Roch, il nous est apparu important de créer une formation interdisciplinaire entre l'informatique et la physique. Il s'agit d'une année supplémentaire entre le M1 et le M2 qui s'appelle ARTEQ et que nous avons créée pendant le confinement en 2020. Cette formation connaît un succès fou et nous devons aujourd'hui plafonner les inscriptions. On prend les étudiants au niveau M1 en sciences pour leur donner le minimum nécessaire en mécanique quantique et informatique et leur faire connaître le monde des technos quantiques avec 6 mois de cours et 6 mois de stage. Avec Marino Marsi et Sophie Kazamias, nous avons pensé qu'il fallait aussi accroître l'attractivité des filières quantiques au niveau international. Nous avons construit et décroché un Erasmus Mundus appelé Quarmen, avec l'université La Sapienza de Rome, les universités de Porto et de Toronto et nous accueillons cette année la première promotion d'étudiants venant du monde entier passionnés par les technologies quantiques.

COMMENT VOYEZ-VOUS L'AVENIR DES TECHNOLOGIES QUANTIQUES ?

L'aventure de l'ordinateur quantique est définitivement lancée. En regardant le passé, nous sommes passés des transistors et des ordinateurs qui remplissaient des salles entières aux composants actuels. Beaucoup de personnes pensaient que les transistors, les lasers resteraient des objets de laboratoire. Nous sommes aujourd'hui avec les technologies quantiques dans une situation similaire. Le privé s'est emparé de ces technologies et les progrès s'accroissent. Je suis convaincue que de plus en plus d'applications vont en découler mais probablement pas celles que nous anticipons aujourd'hui, il est difficile de prévoir ce qui va sortir de ces technologies. Mais les résultats scientifiques sont impressionnants, et je reste certaine que de nombreuses applications vont émerger. A titre personnel, l'aventure Quandela est vraiment passionnante et il est difficile pour moi d'imaginer à quoi elle ressemblera dans quelques années quand je vois la vitesse avec laquelle les choses ont progressé ces derniers mois. C'est une aventure qui me permet de constamment apprendre – c'est une grande chance. Avec tous les progrès technologiques, côté recherche fondamentale, on découvre que l'on peut créer des états très exotiques de la lumière, intriquer par exemple les photons dans la base des nombres. Les possibilités sont grandes et je souhaite aussi réfléchir aux nombreuses possibilités d'applications par exemple pour le sensing. Nous travaillons également en collaboration avec Alexia Auffèves sur l'étude des processus énergétiques au niveau quantique. Le sujet est très compliqué, mais réfléchir avec le prisme de l'énergie nous permet de comprendre différemment comment fonctionne les systèmes quantiques. Tout cela est très intense – et je m'imaginais parfois dans quelques années ralentir un peu – et prendre plus de temps pour enseigner – Pourquoi pas créer une nouvelle filière quantique dans une université de province qui ne serait pas encore lancée dans cette nouvelle aventure ? ●

TÉMOIGNAGE D'ENTREPRENEUR

Mathieu Ribes, POP® Photonics Open Projects

Photoniques s'entretient avec Mathieu Ribes, Président et co-fondateur de POP® Photonics Open Projects



VOUS AVEZ TOUJOURS CHERCHÉ À VOUS INVESTIR DANS LA PHOTONIQUE POUR LE VIVANT

Oui, à la suite de mes études en classe préparatoire en région bordelaise, j'ai intégré l'ENSSAT qui mettait en avant cette discipline. Afin de renforcer encore plus mes compétences dans ce domaine, j'ai réalisé mon premier semestre de 3^e année à l'Abbe School of Photonics de Jena afin de développer davantage mes compétences en biophotonique et en imagerie optique.

À mon retour en Bretagne, j'ai effectué mon stage de fin d'étude à Photonics Bretagne, à Lannion, sur le thème de l'imagerie hyperspectrale à bas coût pour l'agriculture de précision.

C'EST LÀ QUE LE PROJET POP EST NÉ

Ce stage étant un premier succès technique, un projet a été mis en place au sein du partenariat Agrophotonique entre Photonics Bretagne et ARVALIS - Institut du Végétal. Un article a été publié pour diffuser ces premiers développements [1] et un projet de ressourcement a permis entre autres de continuer les développements sur cette technologie permettant de passer d'un prototype low-cost de laboratoire à un démonstrateur en extérieur mesurant

au sein de la plateforme de phénotypage Phénofield [2].

Enfin un projet de maturation d'un an de la techno financé par la région a permis de développer deux capteurs : un kit pédagogique assemblé ou sur pièce pour l'enseignement et le développement ONE-PIX (low-cost et libre) ; une version industrielle PRO-PIX (plus robuste et performante) et de mûrir la réflexion sur le transfert de ces technologies innovantes.

COMMENT AVEZ-VOUS FINANCÉ LE DÉVELOPPEMENT DE LA TECHNOLOGIE ?

Les stratégies de développement de l'entreprise se basent sur une croissance raisonnée, de la transparence et du service rendu (à la communauté ou aux porteurs de cas d'usage à haut niveau d'exigence). En termes de ventes, on mise beaucoup au début sur la communauté ONE-PIX d'enseignement français et européen.

Nous avons nativement une implantation internationale (on réfléchit notamment à multi localiser la production de ONE-PIX en Asie pour limiter les coûts carbonés d'expédition injustifiés).

On souhaite aussi rapidement établir des contrats de distribution et de revente auprès des fournisseurs et distributeurs

de spectromètres. Et d'autres part, nous allons instrumenter les sciences agronomiques et environnementales à travers des plans d'équipements dans les réseaux français et internationaux de phénotypage et d'agriculture de précision avec PRO-PIX.

POUVEZ-VOUS NOUS PRÉSENTER L'ÉQUIPE IMPLIQUÉE DANS CE PROJET ?

POP a la chance de compter sur ses quatre co-créateurs. Gaspard Russias qui est ingénieur en photonique diplômé de l'ENSSAT Lannion en 2017. Il travaille depuis 5 ans chez Photonics Bretagne en tant qu'ingénieur R&D sur diverses problématiques visant à étudier les interactions lumières/matières biologiques. Il assure la fonction de responsable technique au sein de POP. Antoine Fournier est ingénieur opticien et Docteur en télédétection des couverts végétaux. Il est spécialiste capteur pour ARVALIS depuis plus de 10 ans et est le responsable scientifique et commercial au sein de POP. Denis Tregcoat, PhD ingénieur, responsable Biophotonique & CRT au sein de Photonics Bretagne occupe le rôle de business developer. Enfin Mathieu Ribes sera le premier président de POP.

Notre stratégie d'innovation est hybride de par l'animation de cette communauté autour du kit pédagogique et de recherche ONE-PIX dont l'ensemble des informations sont disponibles en ligne sur la plateforme GitHub.

COMMENT S'EST OPÉRÉ LE CHOIX DE CRÉER UNE ENTREPRISE DÉDIÉE À CETTE TECHNOLOGIE ?

A l'issue de ces développements, nous avons eu la volonté de créer une entreprise à quatre pour porter une stratégie différente et adaptée à notre projet. La technologie a été sélectionnée pour sa sobriété numérique et car l'aspect mono-pixel permet de maîtriser la structure des coûts et de garantir son avènement. Par ailleurs, cela permet de créer l'opportunité que nos premiers ambassadeurs et clients soient au cœur d'une communauté active d'utilisateurs. Que cela, on a besoin de pérennité, de sécurité, de stabilité, d'où un modèle coopératif.

QUELLES SONT LES INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES DE VOS PRODUITS ?

On part de concepts technologiques d'imagerie compressée assez récents qui ont été formalisés il y a une quinzaine d'années. On a démontré qu'elles peuvent fonctionner de manière macroscopique, hyperspectrale et en diminuant certains coûts. Cette technologie est intéressante car elle répond exactement à un besoin métier formulé lors des phases de développements. Antoine sait que l'imagerie hyperspectrale est très intéressante pour les besoins en agriculture de précision. Par sa sobriété numérique et sa modularité, on la rend plus attrayante et concrètement utilisable.

VOUS AVEZ OPTÉ POUR UNE STRATÉGIE HYBRIDE D'INNOVATION

A l'image de ce qui a été réalisé avec Arduino, LINUX, on veut créer une communauté active en photonique. On souhaite animer et appuyer une

communauté active d'utilisateurs et de passionnés. Certaines collaborations ont déjà vu le jour notamment avec l'IRHS d'Angers, Nokia Lannion et l'INSERM de Lyon.

Il existe des interactions fortes entre les deux capteurs qui reposent sur l'intelligence que l'on place dans ces capteurs (IA, traitement de signal, IOT...). Il est ainsi stratégique de mettre à disposition d'une communauté d'utilisateurs un outil plus abordable pour mener à plusieurs des développements rendant l'ensemble des capteurs plus intelligents. Notre stratégie d'innovation est hybride de par l'animation de cette communauté autour du kit pédagogique et de recherche ONE-PIX dont l'ensemble des informations sont disponibles en ligne sur la plateforme GitHub [3]. Les bénéfices de cette stratégie permettent d'implémenter de nouvelles solutions et de proposer des services, par exemple pour caractériser le phénotypage des plantes avec le capteur industriel PRO-PIX.

L'INNOVATION PORTE ÉGALEMENT SUR LE FORMAT D'ENTREPRISE

Nous portons également une innovation entrepreneuriale dans le format de la création d'entreprise. Afin d'attirer et de conserver des talents, nous avons choisi un format d'entreprise collaborative SCOP. Les porteurs de savoir-faire sont au centre du projet. L'entreprise POP est pour eux un outil leur permettant

de développer et de diffuser des technologies capacitanes et plus sobres dans les meilleures conditions. Les salariés ont tous une voix décisionnelle. POP reste donc ouvert à tous ceux qui souhaiteraient s'intégrer à cette aventure collaborative pour des technologies d'innovations ouvertes et réelles.

QUELS SONT LES MARCHÉS VISÉS ?

L'imagerie hyperspectrale trouve des intérêts dans beaucoup de domaines. Pour commencer, nous viserons les marchés de l'agriculture de précision, de la géologie, et du paramédical.

QUELLES SONT LES STRATÉGIES DE DÉVELOPPEMENT DE L'ENTREPRISE ?

Les stratégies de développement de l'entreprise se basent sur une croissance raisonnée, de la transparence et du service rendu (à la communauté ou aux porteurs de cas d'usage à haut niveau d'exigence). On souhaite rapidement établir des contrats de distribution et de revente auprès des fournisseurs et distributeurs de spectromètres. Nous avons nativement une implantation internationale (on réfléchit notamment à multi localiser la production de ONE-PIX en Asie pour limiter les coûts carbonés d'expédition injustifiés).

En termes de ventes, on mise beaucoup au début sur la communauté d'enseignement français et européen. On partira à moyen terme sur l'International. Et d'autres part, on attaque fort tout de suite à instrumenter les sciences agronomiques et environnementales à travers des plans d'équipements dans les réseaux français et internationaux de phénotypage et d'agriculture de précision. ●

RÉFÉRENCES

[1] M. Ribes, G. Russias, D. Tregoat, A. Fournier, "Towards Low-Cost Hyperspectral Single-Pixel Imaging for Plant Phenotyping," *Sensors* **20**, 1132 (2020) <https://doi.org/10.3390/s20041132>

[2] <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/phenofield-varietes-tolerantes-secheresse>

[3] <https://github.com/PhotonicsOpenProjects/ONE-PIX>