

# Photoniques

LA LUMIÈRE ET SES APPLICATIONS

## ENTRETIENS

Rémi Carminati  
Loïc Henriot

## FOCUS

Former  
pour innover

## EXPÉRIENCE

Le laser  
à cascade quantique

## ACHETER

Détecteur de photons  
supraconducteur

## DOSSIER

# COMMUNICATIONS QUANTIQUES

- Distribution quantique de clef sur réseau déployé : enjeux et défis
- Génération de photons intriqués pour les communications quantiques avec des dispositifs non-linéaires AlGaAs
- Approches hybrides en cryptographie quantique
- Communications sécurisées avec des variables quantiques continues



- La distribution quantique de clé pour des communications sûres



# Le Hub **Optics & Photonics** de **Systematic** : **votre atout gagnant 2025**



Systematic, pôle européen  
des Deep Tech accompagne près de  
**1.000 adhérents** (*Grands Groupes, ETI,  
PME, start-up, académiques, territoires,  
investisseurs*)



Le Hub **Optics & Photonics** de  
Systematic anime **plus de 200 membres**  
et de très nombreux experts sur des  
secteurs connexes (*Quantique,  
semi-conducteurs,...*)



Montage de projets régional, national  
et européens : **53% de projets labellisés**  
par le pôle **Systematic** ont validé leur  
financement (*chiffre 2023/2024*)



2 ambitions nous guident :  
- **Affirmer le leadership « Optics &  
Photonics »** de l'Île-de-France  
- **Mailler la photonique** avec les autres  
Deep Tech



Rejoignez-nous en 2025 !

Photoniques est éditée par la Société Française de Physique, association loi 1901 reconnue d'utilité publique par décret du 15 janvier 1881 et déclarée en préfecture de Paris.

<https://www.sfpnet.fr/>

Siège social : 33 rue Croulebarbe, 75013 Paris, France  
Tél. : +33(0)1 44 08 67 10

CPPAP : 0124 W 93286  
ISSN : 1629-4475, e-ISSN : 2269-8418

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

 Le contenu rédactionnel de Photoniques est élaboré sous la direction scientifique de la Société française d'optique  
2 avenue Augustin Fresnel  
91127 Palaiseau Cedex, France  
**Florence HADDOUCHE**  
Secrétaire Générale de la SFO  
florence.haddouche@institutoptique.fr

#### Directeur de publication

Jean-Paul Durand, 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

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

#### Advertising Manager

**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

Fabrique imprimeur  
B.P. 10  
87500 Saint-Yrieix la Perche  
Dépôt légal : février 2025  
Routage : STAMP (95)



© EDP Science/SFP à l'exception des articles publiés avec une licence CC-BY dont les droits reviennent aux auteurs.

## Éditorial



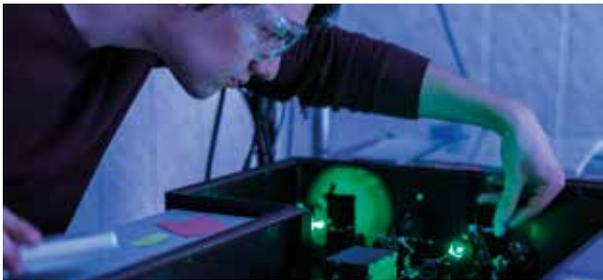
**NICOLAS BONOD**

Rédacteur en chef

## Distribuons les clés au grand public pour l'aider à décrypter les défis scientifiques

L'UNESCO a déclaré 2025 année de célébration des sciences et des technologies quantiques. C'est avec un plaisir certain que nous publions ce numéro, dont la préparation a été initiée de longue date par le comité de rédaction, afin de nous associer pleinement à cette célébration. La France possède une longue et riche expérience en sciences quantiques et s'est rapidement imposée parmi les pays à la pointe dans ce domaine. D'importants efforts ont été placés dans la durée sur ce secteur stratégique et ils portent aujourd'hui leurs fruits : le tissu de laboratoires de recherche et d'entreprises se renforce, le réseau se structure, des formations adaptées se déploient, et des laboratoires communs voient le jour. C'est toute cette dynamique que nous souhaitons mettre en lumière à travers ces pages. Nous dévoilons dans ce numéro un dossier spécial sur les communications quantiques, pour lesquelles la photonique joue un rôle central. L'intrication et la distribution de clés quantiques sont au cœur d'un changement de paradigme notamment pour garantir la sécurité des communications. Cela implique de relever des défis majeurs tout au long de la chaîne, depuis la génération et la détection de photons intriqués en régime quantique jusqu'à la distribution des clés sur les réseaux de communication. Comme vous pouvez le voir, les experts de ces domaines se sont mobilisés pour participer à ce numéro. Je les remercie chaleureusement pour

avoir mis au service de la communauté des articles précieux et rédigés avec soin, véritables trésors en accès libre. Pour franchir les murs des laboratoires, les technologies quantiques s'appuient principalement sur les technologies photoniques classiques. Cette synergie entre optique classique et quantique profite à l'ensemble de la filière photonique et stimule l'innovation dans de nombreux secteurs. Afin d'accompagner cet essor, l'offre de formation évolue rapidement. Ce numéro consacre son focus aux nouvelles formations en optique et photonique, car ces dernières années – voire derniers mois – de nombreux cursus ont vu le jour. Ce sujet, essentiel pour l'avenir de la filière, nous tient particulièrement à cœur et nous vous invitons à découvrir ce focus, fruit d'un long travail, qui dresse un panorama large des nouvelles offres de formation. Dans un contexte où les financements de la recherche se voient soudainement fortement fragilisés, le cas des États-Unis doit nous alerter, le soutien de la société civile à la science devient plus important que jamais. Cette année de célébration des sciences et technologies quantiques est une formidable occasion d'accroître la visibilité de nos activités, d'éveiller la curiosité et de susciter l'intérêt d'un public large. Ensemble, distribuons les clés au grand public pour lui permettre de comprendre les concepts scientifiques et décrypter les défis scientifiques de demain.



# Sommaire

www.photoniques.com

N° 130

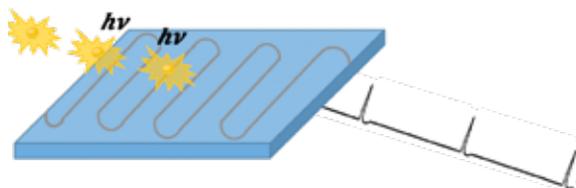
**18 FOCUS**  
Former pour innover : évolution de l'offre de formation en photonique en France



**41**

Génération de photons intriqués pour les communications quantiques avec des dispositifs non-linéaires AlGaAs

**60**  
Détecteur de photons supraconducteur



## ACTUALITÉS

- 03 Éditorial et actualité de la SFO
- 05 Informations partenaires
- 11 Mots croisés : communications quantiques
- 12 Entretien : Rémi Carminati - Loïc Henriot

## FOCUS

- 18 Former pour innover

## GRAND PROJET

- 24 Le réseau REFIMEVE : le temps et la fréquence de haute performance à la portée de tous

## EXPÉRIENCE MARQUANTE

- 30 Le laser à cascade quantique

## DOSSIER : COMMUNICATIONS QUANTIQUES

- 35 Distribution quantique de clé sur réseau déployé : enjeux et défis
- 41 Génération de photons intriqués pour les communications quantiques avec des dispositifs non-linéaires AlGaAs
- 46 Approches hybrides en cryptographie quantique
- 49 Communications sécurisées avec des variables quantiques continues

## COMPRENDRE

- 55 La distribution quantique de clé pour des communications sûres

## ACHETER

- 60 Détecteur de photons supraconducteur

## PRODUITS

- 65 Nouveautés

## Annonces

2B lighting.....	63	HTDS.....	27
Edp Sciences.....	57	ID Quantique.....	53
Epic.....	09	Imagine Optic.....	59

Opton laser.....	33, 45, IV° couv.
Mad City Labs.....	47
Scientec.....	61

Systematic..... II° couv.

Crédit photo (couverture) : © iStockPhoto

# L'édito de la SFO

---



**FRANÇOIS SALIN**  
Président de la SFO



**ARIEL LEVENSON**  
Président sortant de la SFO

## Un peu de lumière sur le travail dans l'ombre !

**B**eaucoup de nos actions jouissent d'une grande visibilité, par construction. A l'instar des précédents, notre congrès OPTIQUE Bourgogne-Franche-Comté 2026 trotte déjà dans nos têtes. C'est le cas également de nos prix, comme le Prix Jean Jerphagnon 2025 dont les candidatures sont ouvertes. Pour les communautés concernées, les JNOG 2025 à Sète, l'École LIDAR 2025 à l'Observatoire de Haute Provence sont connus et attendus. Notre école annuelle aux Houches est reconnue, d'ailleurs celle 2025 sur le Niobate de Lithium en couches minces affiche complet avec une impressionnante liste d'attente qui, hélas, ne pourra pas être satisfaite. D'autres actions ne bénéficient cependant pas de la même visibilité, ou alors après une longue traversée de tunnel, mais elles existent et avancent grâce à l'engagement dévoué de nombreux bénévoles de notre SFO qui ne lésinent pas sur leurs efforts.

Nous avons évoqué dans l'édito 120 l'immense travail déployé autour de la LigthBox, le kit photonique adaptable à des publics divers, qui heureusement devient de plus en plus connu au fil des années. Le projet LUMIFORM 2030 auquel nous participons pourrait, si accepté, contribuer à une plus ample diffusion (voir encadré dans l'article de Nathalie Destouches).

Le programme PÉPITES de l'optique française, visant à préserver et faire connaître le patrimoine immatériel de notre communauté, constitue un autre exemple. Il s'agit encore une fois d'un programme de longue haleine, non financé. Mais nous avançons. En plus des 14 interviews évoqués dans Photoniques 122, nous sommes heureux d'avoir accompagné le C2N, aux côtés de la SFP, pour les journées « 40 ans des boîtes quantiques épitaxiées – Hommage à Jean-Yves Marzin » qui se sont tenues les 23 et 24 janvier. Après une année de travail, ces journées, qui ont réuni plus de 200 participants, ont permis de retracer l'épopée des boîtes quantiques

auto-organisées. En présence de nombreux protagonistes historiques, dont Léon Goldstein premier auteur de l'article fondateur, elles ont été l'occasion de rendre hommage à Jean-Yves Marzin, co-auteur de cet article et pionnier de l'étude optique des boîtes quantiques épitaxiées. Une dizaine d'interviews ont pu être réalisées, qui seront disponibles.

Pour terminer, un autre exemple. Notre commission Réussir la Parité en Optique réalise un travail remarquable aux côtés de son homologue de la SFP. Favoriser les vocations des jeunes filles et des meilleures conditions d'inclusion des collègues dans le milieu de l'enseignement supérieur et de la recherche et dans les entreprises de la photonique est un travail de longue haleine, aussi crucial que consommateur de temps. Pour aller plus loin il nous a paru nécessaire de développer des outils pouvant être repris par des acteurs autres que les collègues de notre communauté, par exemple des enseignants et enseignantes du primaire et du secondaire, des médiateurs et médiatrices, des parents d'élèves. Le projet « Vocation et Inclusion pour la Parité en Sciences » (VIPS) vient d'être déposé dans ce but. Il est construit autour d'un consortium constitué à l'initiative de la SFO, qui inclut la SFP et le C'Nano et qui a reçu l'appui de CNRS Physique, de l'association Matrice, de l'association Femmes et Sciences et d'acteurs du Palais de la Découverte. Espérons.

Il ne suffit pas de clamer que la lumière soit, ... mais nous avançons !

Photoniquement vôtre  
**Ariel Levenson**  
Directeur de recherche CNRS  
Président sortant de la SFO  
**François Salin**  
Président et CEO Ilasis laser  
Président de la SFO

## Rejoignez l'Exposition Industrielle de CNANO 2025

Pour la sixième édition de C'Nano 2025 : The Nanoscience Meeting, le Cluster de Compétence National en Nanosciences du CNRS (C'Nano) organise son grand événement interdisciplinaire consacré aux nanosciences, en partenariat avec le PEPR Électronique. La Société Française d'Optique apporte son expertise à l'organisation de l'exposition industrielle de CNANO 2025. Elle offre aux entreprises un cadre optimal pour promouvoir leur savoir-faire, mettre en avant leurs produits innovants, et créer de nouvelles opportunités d'affaires. Plus de 600 chercheurs et professionnels des nanosciences se rassembleront pour échanger et innover.

Parmi les exposants, ATLANT 3D, VSPARTICLE, Vmicro, NKT Photonics, Tektronix, Microlight3D et InProcess-LSP présenteront leurs dernières solutions dans les domaines de l'optique, des mesures et de la fabrication en nanosciences. Cet événement constitue une occasion unique de développer des collaborations, renforcer son réseau et explorer les dernières avancées des nanotechnologies.

**Rejoignez ces leaders et participez à cet événement incontournable des nanosciences !**

### AGENDA

■ **Journée F2S Science et Progrès 2025**  
**LA RÉVOLUTION SPATIALE DE L'ASTRONOMIE**  
 11 mars 2025 à l'ENS, Paris 5<sup>e</sup>.

**C'NANO 2025**  
 18 au 21 mars 2025  
 Cité des sciences, Paris

**École LIDAR**  
 15 au 20 juin 2025, OHP,  
 Observatoire de Haute  
 Provence, France  
 40 participants attendus

**JNOG Montpellier 2025**  
 07 au 10 juillet 2025, Sète  
 + 160 participants attendus

## Appel à Candidature Prix Jean Jerphagnon 2025 Récompense de l'innovation en optique et photonique



Le Prix Jean Jerphagnon 2025 est officiellement lancé ! Ce prix prestigieux, organisé par la Société Française d'Optique (SFO) récompense l'excellence en Optique-Photonique, en mettant à l'honneur un chercheur ou chercheuse, ingénieur ou ingénieure dont les travaux ont un impact significatif sur ces domaines, tant sur le plan scientifique que technologique. Il célèbre des projets de recherche appliquée à fort potentiel industriel et de transfert technologique. Le jury prestigieux du Prix Jean Jerphagnon 2025 est présidé par Alain Aspect, lauréat du Prix Nobel de Physique 2022, une reconnaissance qui témoigne de l'importance de ce prix.

Créé en l'honneur de Jean Jerphagnon, pionnier de la recherche en optique et photonique, ce prix distingue chaque année une personnalité ayant contribué au développement de ces technologies en lien avec les applications industrielles. Ce prix a été décerné à des figures emblématiques de l'innovation en optique et photonique, parmi lesquelles : Julien LAURAT, reconnu pour ses travaux sur les mémoires quantiques et les réseaux quantiques ; Niccolo SOMASCHI, dont les recherches sur l'informatique quantique ont permis à QUANDELA d'ouvrir une nouvelle ère dans le domaine de l'informatique quantique avec l'inauguration de sa première usine d'ordinateurs quantiques ; Kate GRIEVE, qui a révolutionné l'imagerie oculaire avec la création de la startup SharpEye ; ainsi que Emmanuel HUGOT, Yoann ZAOUTER, Antoine DUBROUIL, Sylvain GIGAN, Vincent STUDERT, Sébastien FEVRIER, Frédéric GEROME, Arnaud ROYON, Nicolas TREPS, Emmanuel FORT, Frédéric DRUON, Laurent COGNET, Philippe BOUYER, et Nathalie PICQUE, dont les contributions ont façonné l'avancement technologique de ces domaines.

Le Prix est ouvert aux chercheurs, ingénieurs ou entrepreneurs en optique et photonique travaillant en France, ayant des projets à fort potentiel de transfert technologique et d'impact industriel.

**Déposez votre candidature avant le 31 mars 2025 sur le site officiel de la SFO [www.sfoptique.org](http://www.sfoptique.org) rubrique Prix Jean Jerphagnon**

Le Prix Jean Jerphagnon est une occasion unique de valoriser votre travail, d'accroître votre visibilité et de propulser vos innovations vers l'industrialisation. Le prix inclut une dotation financière et offre une visibilité accrue ainsi qu'un réseau privilégié pour le développement du projet récompensé.

Le lauréat et les nominés seront annoncés lors de la session du Prix Jean Jerphagnon, lors des Journées Nationales d'Optique Guidée, **JNOG à Sète le mercredi 09 juillet 2025.**

Cette session sera introduite par Fabrice RAINERI, nommé 2022 du Prix Jean Jerphagnon et cofondateur de Ncodin spécialiste dans le développement de puces nanophotoniques révolutionnaires au service des super ordinateurs de nouvelles générations.

## Photonics Bretagne et ses adhérents en force à Photonics West

Photonics Bretagne a participé au salon Photonics West, du 28 au 30 janvier 2025 à San Francisco, au sein du Pavillon Français. Cet événement international phare de l'industrie photonique a été l'occasion de présenter notre expertise en fibres optiques spéciales et composants, avec un intérêt marqué pour nos nouvelles fibres infiniment monomodes à gros cœur, optimisées pour le transport de lasers haute puissance à fréquence unique, ainsi que nos fibres dopées au bismuth, destinées à améliorer la bande passante disponible *via* un amplificateur en bande O, pour les télécommunications. Aux côtés de Photonics Bretagne, plusieurs adhérents ont également exposé leurs technologies, illustrant le dynamisme de la filière photonique française. Parmi eux, Cailabs, Exail, Le Verre Fluoré, Imagine Optic, Leukos, Kwan-Tek, Oxxius, Data-Pixel, Alphanov, Iriosome Solutions, BKtel Photonics, Alpha-RLH, SEDI-ATI Fibres Optiques, Amplitude Laser, EXFO, Lumibird, Thalès, OptoSigma, Somos, Toptica Photonics et Vanguard Automation. Un cocktail de networking organisé avec Business France et ALPHA-RLH a également permis de renforcer les échanges avec les acteurs américains.



## Projet uCAIR : une nouvelle étape pour le diagnostic de cancer en temps réel



Le projet européen uCAIR vise à révolutionner le diagnostic médical en développant un système innovant d'imagerie hyperspectrale pour la détection du cancer en temps réel. Une avancée clé vient d'être réalisée par l'équipe fibre de Photonics Bretagne avec la caractérisation optique d'une nouvelle fibre optique microstructurée dédiée à la génération de signal supercontinuum cohérent. Cette fibre sera intégrée par le partenaire Multitel dans son laser, avec une première démonstration clinique prévue dans l'année. Une étape décisive vers des diagnostics plus rapides et précis !

## EXAIL ACQUIERT LEUKOS

Avec cette acquisition, Leukos se positionne désormais comme une filiale d'Exail, et apporte plus de 20 ans d'expertise notamment dans le développement de micro-lasers pulsés, sources laser supercontinuum et lasers à fibre ultrarapides. En combinant les technologies avancées de Leukos avec l'expertise d'Exail dans les fibres spéciales, la modulation, les assemblages micro-optiques et les systèmes quantiques, le groupe améliore son offre de produits et élargit ses solutions pour répondre à de nouveaux marchés, y compris la biophotonique et la microélectronique.

## IDIL Fibres Optiques rejoint Fiber Optics Group

Fiber Optics Group, experte en assemblages de fibres optiques pour environnements extrêmes par le biais de l'acquisition de SEDI-ATI Fibres Optiques en juillet 2023, annonce l'acquisition d'IDIL Fibres Optiques, experte des systèmes et sous-systèmes opto-électroniques dédiés à la fibre optique. Basée à Lannion et fondée en 1995 par Patrice Le Boudec, IDIL Fibres Optiques développe et fabrique 4 grandes lignes de produits : assemblages de fibres et composants, systèmes optoélectroniques et lasers, ingénierie et services en spectroscopie et photonique. L'opération permet d'accueillir le fondateur et CEO d'IDIL Fibres Optiques, Patrice Le Boudec, au capital de Fiber Optics Group, qui poursuivra l'aventure en tant que Directeur Général d'IDIL et membre du Comité Stratégique de Fiber Optics Group.

## Certification ISO9001



Photonics Bretagne a renouvelé sa certification ISO9001 pour 3 ans. Cela témoigne de notre excellence opérationnelle et de notre engagement à satisfaire nos clients, adhérents et partenaires. Cette norme internationale est gage de qualité de nos produits et services, nous aidant ainsi à développer de nouveaux marchés, notamment auprès de grands groupes.

## AGENDA



■ **Blue Event Photonique & Mer**  
13 mars, Lannion

■ **OFC**  
1-3 avril, San Francisco (États-Unis)

■ **Laser World of Photonics**  
24-27 juin, Munich (Allemagne)

■ **ITQW 2025 – Infrared and Terahertz Quantum Workshop**  
1-5 septembre, Saint-Malo

■ **Photonics PhD Days**  
24-26 septembre, Lannion

## En chiffre

# 98%

des stagiaires de la Formation Continue de l'Institut d'Optique sont satisfaits de la qualité de la formation qu'ils ont suivie en 2024. 98% apprécient particulièrement la pédagogie des intervenantes et intervenants et 93% sont satisfait de l'équilibre entre les parties théoriques et pratiques. Ces données sont issues des résultats des questionnaires transmis aux 220 personnes ayant participé à nos formations en 2024.

## AGENDA FORMATION CONTINUE

■ **Infrarouge thermique : choix et utilisation d'une caméra**  
01-04 avril 2025

■ **Systèmes optiques d'imagerie**  
07-11 avril 2025

■ **Acquisition d'images avec une caméra**  
08-10 avril 2025

■ **Approche contemporaine des fondamentaux du traitement d'image et de la vision par ordinateur**  
28-30 avril 2025

■ **Colorimétrie**  
05-06 mai 2025

■ **Conception optique avec Code V**  
12-16 mai 2025

■ **L'optique sans calcul**  
13-15 mai 2025

■ **Conception optique de systèmes d'imagerie avec Zemax/OpticStudio-Initiation**  
20-23 mai 2025

### CONTACT

Clémentine Bouyé,  
responsable  
de la communication  
clementine.bouye  
@institutoptique.fr



## Un projet européen pour promouvoir les carrières en photonique

L'Institut d'Optique est partenaire du projet européen 360 CARLA lancé en janvier 2024, coordonné par l'ICFO (Institute of Photonic Sciences, Barcelone).

Ce projet vise à promouvoir auprès d'étudiants et de jeunes chercheurs les carrières dans le domaine de la photonique. Il crée des programmes de développement de carrière axés sur les applications photoniques suivantes :

- Santé : Biotechnologie et photonique médicale
- Communications et technologies quantiques
- Énergie, environnement et durabilité
- Manufacturing / Industrie 4.0

Le projet se donne pour mission de fournir aux participantes et participants une vision globale des opportunités professionnelles au sein de l'écosystème photonique pour les différentes applications citées ci-dessus.

Les actions proposées au sein des programmes prennent des formes variées : des symposiums thématiques pour présenter des métiers et des parcours en photonique, des formations et ateliers adaptés à chaque secteur pour développer des compétences techniques, des visites dans des entreprises et des centres de recherche, des opportunités de « réseautage » et de mentorat.

Au cours des deux ans et demi que durent le projet, plus de 50 événements seront organisés dans 11 pays d'Europe par les 12 institutions qui composent le consortium. L'Institut d'Optique a choisi de s'impliquer sur la thématique « Communications et technologies quantiques » et organisera sur son campus de Paris-Saclay un symposium, des formations et des immersions en entreprises et centres de recherche du domaine.

### Première action de l'Institut d'Optique : une formation sur l'interférométrie à atomes froids



Une première action a déjà été menée par l'Institut d'Optique en décembre dernier dans ses locaux de Palaiseau. Une vingtaine d'étudiants de niveau Master 1 ont participé à une journée de formation sur l'interférométrie à atomes froids animée par Vincent Ménoret, responsable R&D pour les capteurs inertiels chez Exail.

Cette formation leur a permis de comprendre les principes de la mesure du champ de gravité à l'aide d'atomes froids et de découvrir le rôle et l'impact de la photonique dans un système de gravimètre à atomes froids. Ils ont également eu la chance de prendre le contrôle à distance d'un véritable gravimètre afin d'acquérir des données interférométriques en temps réel. La journée s'est conclue par une discussion autour des carrières dans les entreprises de technologies quantiques.

## Assemblée générale et conférences : Les Grands Projets photoniques

Photonics France organise son assemblée générale annuelle le 9 avril 2025 à Paris. À cette occasion est organisée une après-midi de conférences sur le thème « Les Grands Projets photoniques : perspectives d'avenir pour la filière française ».

À l'occasion de son Assemblée générale 2025, Photonics France organise une après-midi de conférences sur le thème : « Les Grands Projets photoniques : perspectives d'avenir pour la filière française ». Rendez-vous de 14h à 16h30 au siège de Bpifrance à Paris.



Des représentants de Thalès, d'Amplitude, de l'IOGS, d'Essilor, du CNRS et de Bpifrance présenteront un éventail de projets en cours qui ouvrent des perspectives de développement pour la filière photonique.

*L'Assemblée générale statutaire est organisée le matin à 10h au même endroit. Elle est réservée aux adhérents de Photonics France.*

### Business Meeting

## La Photonique avec HORIBA

Photonics France organise un Business Meeting en partenariat avec HORIBA le 20 mars 2025. Venez les rencontrer et apporter vos solutions à l'occasion de cette journée.



HORIBA propose une large gamme d'instruments et de systèmes pour des applications telles que la R&D automobile, les processus et la surveillance de l'environnement, le diagnostic médical in vitro, la fabrication de semi-conducteurs et la métrologie, ainsi que diverses mesures scientifiques pour la R&D et le contrôle qualité.

Durant une journée de conférences et d'ateliers, HORIBA France présentera ses besoins et perspectives en technologies et en partenariat sur les sujets lasers, capteurs, instrumentations, micro-électronique.

Nous vous donnons rendez-vous le 20 mars 2025 de 9h à 17h au HORIBA Europe Research Center.

Venez apporter à HORIBA France vos solutions innovantes et échanger avec d'autres fournisseurs du domaine. Inscrivez-vous avant le 6 mars 2025 sur le site web de Photonics France : <https://www.photonics-france.org>

## Bienvenue à notre nouvel adhérent !



Centrale Méditerranée est une grande école d'ingénieurs publique, membre du réseau des écoles Centrale. Établissement scientifique international, elle forme en ingénierie à Marseille et à Nice des étudiants capables de manager, créer et innover dans un monde complexe.

Adhérer à Photonics France, c'est bénéficier de nombreux services pour développer votre réseau professionnel et vos activités. C'est contribuer également à une représentation solide de toute la filière photonique auprès des pouvoirs publics. Rejoignez-nous !

### AGENDA

Nos prochains rendez-vous :

■ **Rencontre avec les nouveaux adhérents**  
4 mars 2025 – webinaire

■ **Minalogic Business Meetings**  
18 mars 2025 - Lyon (hybride)

■ **Business Meeting : La Photonique avec Horiba**  
20 mars 2025 – Palaiseau

■ **Assemblée générale 2025**  
9 avril 2025 - Paris

CONTACTER  
PHOTONICS FRANCE

[contact@photonics-france.org](mailto:contact@photonics-france.org)  
[www.photonics-france.org](http://www.photonics-france.org)

## AGENDA

■ **Semaine des Champions Systematic :**  
14 mars : **Quandela :**  
**Le calcul quantique face aux enjeux énergétiques : réalisations et horizons**  
<https://urlr.me/dM8JuR>

■ **WHAT'S ON Tour Another Day of Photonics**  
7 au 11 Avril 2025  
organisé avec Photonics NL, SEDI ATI Fibres Optiques et Systematic

■ **So Deep Tech special « 20 ans de Systematic »**  
2 Juillet 2025

■ **French Photonic Days Novembre 2025**  
organisés avec Systematic, Photonics France, Alumnis de l'IOGS

## [ZOOM SUR]

# Quandela est Champion 2024 du Pôle Systematic !



**Q**uandela est une entreprise leader du calcul quantique qui conçoit, construit et fournit des solutions quantiques de pointe pour l'industrie : ordinateurs quantiques prêts à l'emploi pour les datacenters, processeurs quantiques accessibles *via* le cloud, et services d'accès aux algorithmes. La mission de Quandela est claire : rendre l'informatique quantique accessible à tous pour relever les défis industriels et sociétaux les plus complexes.

Retrouvez l'interview de Valérian Giesz, CEO de Quandela :

[https://systematic-paris-region.org/success\\_story/interview-champion-rencontre-avec-valerian-giesz-cofounder-quandela-champion-2024-du-pole-systematic/](https://systematic-paris-region.org/success_story/interview-champion-rencontre-avec-valerian-giesz-cofounder-quandela-champion-2024-du-pole-systematic/)

## CONTACT

Vous souhaitez connaître l'écosystème de la photonique, développer de nouvelles collaborations majoritairement en Île de France mais aussi hors Île de France, vous impliquer dans des secteurs stratégiques tels que la Data, l'IA, le Quantique, la Décarbonation, le Semi-Conducteur alors n'hésitez plus et rejoignez-nous !  
Une question ?  
Un renseignement ?

Contactez Najwa Abdeljalil, Coordinatrice du Hub :  
[najwa.abdeljalil@systematic-paris-region.org](mailto:najwa.abdeljalil@systematic-paris-region.org)



## Tout savoir sur la mesure de précision et du contrôle qualité

Polytec, spécialisée en solutions technologiques de mesure optique pour la recherche et l'industrie organise une série de webinaires sur des sujets techniques innovants dans le domaine mesure de précision et du contrôle qualité. N'hésitez pas à vous inscrire !

### 1. Maîtrisez la Métrologie de Surface :

technologies et norme ISO 21920, le 26 février à 14h  
<https://urlr.me/Yys2EG>.

### 2. Améliorez vos contrôles qualité :

les dernières avancées en deep learning, le 26 février à 11h  
<https://urlr.me/TMzdZF>.

### 3. Caractérisation vibratoire :

de la mesure ponctuelle à l'analyse modale, le 19 mars à 14h  
<https://urlr.me/RCdwfS>.



EPIC is here  
to support you!

Be part of the largest Photonics  
Industry Community in Europe

## Actualités

**Workshop annuel Nanophotonics de NANO-PHOT** en présence de Sasha Govorov de l'Université d'Ohio, 6 février à l'UTT.

**L'Institut photonique dont l'UTT est membre, a ouvert son site Web :**  
<https://institut-photonique.fr/a-propos/les-fondateurs/>



**L'UTT obtient le label DD&RS :** <https://www.utt.fr/actualites/universite-de-technologie-de-troyes-obtient-la-labellisation-developpement-durable-et-responsabilite-societale-ddrs>

### AGENDA

■ **Conférence SPP**  
19 au 23 mai 2025, Tokyo, Japon  
<https://spp11.tokyo/>

■ **ISPN 2025**  
16-20 février 2025, Singapour  
<https://www.ispn2025.com/>

■ **Congres général de la SFP**  
30 juin-4 juillet, Troyes, France  
<https://cgf2025.sciencesconf.org/>

■ **Gold Conference**  
11-14 Mai, San Sebastian, Portugal  
<https://www.rsc.org/events/detail/80378/the-world-conference-on-gold-2025>

■ **META 2025**  
22-25 juillet, Malaga, Espagne  
<https://metaconferences.org/META25/index.php/META/index>

### CONTACT

<https://nano-phot.utt.fr/>  
[nanophot@utt.fr](mailto:nanophot@utt.fr)

## Retour sur la conférence NFO-17

La 17<sup>e</sup> conférence internationale sur l'optique en champ proche, la nanophotonique et les techniques connexes (NFO-17) s'est tenue à Melbourne en décembre : <https://lnkd.in/ewMX7tAq>. Cet événement s'inscrivait dans le cadre du congrès 2024 de l'Institut australien de physique. L'école Universitaire de Recherche NANO-PHOT de l'UTT ([nano-phot.utt.fr](https://nano-phot.utt.fr/)) a sponsorisé la conférence et a décerné des prix aux meilleurs posters :

**1<sup>er</sup> prix.** Eduardo Dias, postdoc à l'Université du Sud, Danemark « Active control of Smith-Purcell radiation emission using 2D nanoribbons »

**2<sup>e</sup> prix.** Komal Gupta, doctorant à l'Université nationale Tsing Hua, Taiwan « Phase-Matching the Second-Harmonic Generation in a Plasmonic Two-Wire Transmission-Line ».

**3<sup>e</sup> prix.** Anand Hegde, doctorant à l'université nationale Tsing Hua, Taiwan, « Optical Merons in Free Space and Their Rapid Height Dependent Conversion ».

Comme toujours depuis 1992, la conférence NFO a été très inspirante en termes de sujets d'actualité incluant les métamatériaux photoniques, la nano-optique quantique, la microscopie et la spectroscopie optiques en champ proche, la nanoplasmonique hybride, la nano-optique infrarouge, la nanophotochimie et les capteurs. Renaud Bachelot, directeur de NANO-PHOT, a donné un cours à l'école d'été de NFO-17, intitulé « Weak and Strong Coupling in Hybrid Plasmonic Nanosystems », basé sur ses activités de recherche au L2n (France, [l2n.utt.fr](https://lnkd.in/e5v3YE7G)) et à CINTRA (Singapour, <https://lnkd.in/e5v3YE7G>). Six ans après NFO-15 (UTT, Troyes, France), NFO sera de retour en Europe : la conférence NFO-18 aura lieu dans 2 ans à BRNO, en République Tchèque. NANO-PHOT soutiendra l'événement.

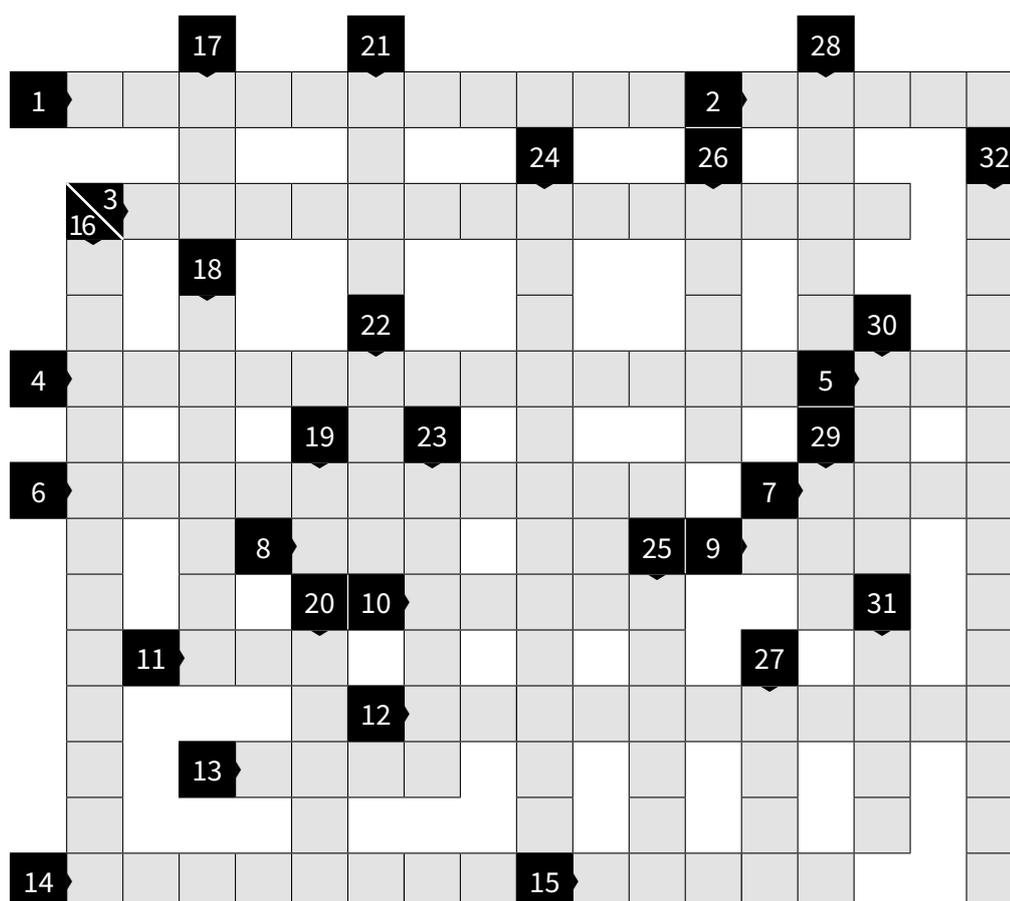


**Résultat scientifique : première démonstration de l'utilisation de la chimie du diazonium pour une intégration sélective de boîtes quantique émettrices de lumière sur fibre optique**

Shang Li, doctorant au sein de NANO-PHOT, a développé une méthode de fabrication de pointes fibrées luminescentes à base des boîtes quantiques quantiques (QD), basée sur un processus séquentiel impliquant la photopolymérisation d'un triacrylate de pentaérythritol à travers une fibre optique pour créer une première pointe en polymère. Une seconde pointe est fabriquée *via* la chimie d'un sel de diazonium pour la fonctionnalisation de la surface, et l'immobilisation des QDs par interaction électrostatique. La pointe hybride a été testée comme capteur de concentration de nanoparticules de ZnO en solution basé sur la modification de la durée de vie de la photoluminescence des QDs en présence des nanoparticules. Ces résultats montrent le potentiel de ce type de pointe en tant que capteur pour une nouvelle méthode non destructive et flexible de détermination de la concentration de nanoparticules en solution. Cf. article sur <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.4c05092>

# MOTS CROISÉS SUR LE THÈME DES COMMUNICATIONS QUANTIQUES

Par Philippe ADAM



SOLUTION SUR  
PHOTONIQUES.COM



- |    |   |    |  |
|----|---|----|--|
| 1  | Enchevêtrement quantique                                    | 16 | Responsables des transitions quantique-classique                 |
| 2  | Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information  | 17 | Algorithme de Grover   |
| 3  | Supports de réseau  | 18 | Atomes permettant de concevoir des bits quantiques               |
| 4  | Si quantique, assure l'inviolabilité des échanges           | 19 | Intelligence artificielle  |
| 5  | TeQ constitue un tel groupement                             | 20 | Auteur d'un algorithme de factorisation                          |
| 6  | Mélange des technologies classiques et quantiques           | 21 | Ouvrent des portes quantiques ?                                  |
| 7  | Quantum Secure Networks Partnership                         | 22 | Forme une dualité fondamentale avec le corpuscule                |
| 8  | Standard de chiffrement avancé                              | 23 | Des inégalités lui ont valu le prix Nobel en 2022                |
| 9  | Laboratoire français, acteur majeur en physique quantique   | 24 | Observable dans l'expérience d'Alain Aspect                      |
| 10 | Une caractéristique d'un état quantique à température nulle | 25 | Tour pour l'organisation de France Quantum Conference en 2022    |
| 11 | Pour l'heure, alternative à la boussole quantique           | 26 | Unité de base de l'information quantique                         |
| 12 | Encodage  | 27 | Ensemble Complet d'Observables qui Commutent                     |
| 13 | Animal préféré de Schrödinger                               | 28 | Plus efficace dans un réseau que dans le cerveau !               |
| 14 | Non-clonage et superposition sont ses deux piliers          | 29 | Distribution de clés   |
| 15 | Lewis Carroll n'avait pas imaginé ses aventures quantiques  | 30 | Matériau dans la boîte   |
|    |   | 31 | Physicien dans tous ses états                                    |
|    |   | 32 | Transmission de signal classique et quantique dans la même fibre |



## Entretien avec Rémi Carminati

**Directeur général de l'Institut d'Optique, professeur à l'ESPCI Paris-PSL, chercheur à l'Institut Langevin en nanophotonique et en physique des ondes en milieux complexes.**

<https://doi.org/10.1051/phys/202513012>

### COMMENT AVEZ-VOUS DÉCOUVERT LES SCIENCES ?

J'ai toujours eu envie de faire de la science. Les professeurs de lycée jouent un rôle important sur les orientations et j'ai eu la chance d'avoir d'excellents profs de physique. En première à mon époque, il y avait beaucoup de physique des ondes. Un matin en cours, le professeur a apporté un laser avec une fente réglable et il a projeté sur le mur blanc au fond de la classe une figure de diffraction. Il avait projeté l'image de la fente, et puis, en diminuant la taille de la fente, on a vu apparaître au fond de la salle la figure de diffraction du laser. Je me souviens d'avoir été fasciné par ce phénomène et de m'être dit qu'un jour j'aimerais être capable de le comprendre en détail. Quand j'étais en prépa, j'attendais impatiemment qu'en maths spé nous abordions l'optique physique et les équations de Maxwell.

### COMMENT AVEZ-VOUS CHOISI VOTRE SUJET DE THÈSE ?

Par la suite, c'est en 2<sup>e</sup> année d'Ecole d'ingénieur à Centrale Paris que j'ai eu le déclic. J'avais eu la chance d'avoir Jean-Jacques Greffet comme professeur. Ses cours étaient fascinants et je savais alors que je souhaitais poursuivre en recherche. J'ai toujours été attiré par l'idée d'aller aux frontières des connaissances d'une discipline. En 3<sup>e</sup> année, je suivais en parallèle un DEA (le Master 2 de l'époque), et quand j'ai décidé de chercher une thèse, je me suis assez vite tourné vers Jean-Jacques Greffet. J'ai effectué mon stage de DEA dans son équipe, encadré par Anne Sentenac qui était sa première doctorante. Je sentais qu'il menait des recherches intéressantes et il y avait un bon

feeling personnel. C'est ainsi que j'ai eu la chance de démarrer ma thèse en 1993 sous sa direction.

### QUELS ONT ÉTÉ LES PRINCIPAUX RÉSULTATS DE VOTRE THÈSE ?

Cette époque correspond au tout début de ce qu'on appelait l'optique de champ proche, et qui est devenu aujourd'hui la nanophotonique. Pour donner une idée, la première conférence de microscopie optique en champ proche s'était déroulée en 1992. Jean-Jacques y avait participé et était revenu avec beaucoup d'idées. Les premières expériences en France étaient menées à Besançon, Dijon et Paris. Nous étions une poignée de thésards à commencer à travailler sur la théorie de l'optique de champ proche, avec notamment Lukas Novotny ou Olivier Martin. C'est dans ce contexte scientifique que j'ai commencé mes travaux. Un de nos apports a été d'introduire des outils théoriques pour l'interprétation des images en microscopie de champ proche. Un enjeu était de découpler l'interaction entre la pointe et l'objet afin d'obtenir une information pertinente sur l'objet. J'ai ensuite été le témoin de la transition, vers la fin des années 1990, entre une vision de la thématique très centrée sur la microscopie et une vision plus large de physique sub-longueur d'onde qui a ouvert le champ de la nanophotonique. L'idée était de faire de l'optique avec des pointes, avec des nanoparticules, des émetteurs uniques... Je me souviens d'exposés de Dieter Pohl qui expliquait qu'il fallait penser en termes d'interaction avec des antennes. Il a amené l'idée qu'on pouvait utiliser des pointes ou des nanoparticules comme des nano-antennes pour l'optique, et ce n'était pas une évidence à ce moment là.

### COMMENT S'EST DÉROULÉ VOTRE POST-DOCTORAT ?

Je suis parti en 1996-97 en post-doc à Madrid dans le groupe de Manuel Nieto-Vesperinas qui travaillait sur la diffusion par des surfaces rugueuses et sur l'optique de champ proche. Mon post-doc concernait la nanophotonique théorique. Manuel commençait également à s'intéresser à l'imagerie en milieu diffusant. Il avait pris un doctorant sur ce sujet, et j'ai commencé à m'intéresser aux milieux diffusants en co-encadrant ce doctorant en parallèle de mes travaux en nanophotonique. C'est à partir de ce moment là que j'ai mené de front des activités de recherche sur ces deux thématiques.

### C'EST À CE MOMENT QUE VOUS RENTREZ EN FRANCE

Fin 1997, je deviens Maître de Conférence à l'Ecole Centrale Paris et je rejoins le groupe de Jean-Jacques Greffet. Cette époque correspond au début des questionnements de Jean-Jacques sur la cohérence du rayonnement thermique suite à des expériences qu'il avait menées avec le CEA. Il réfléchissait à la question « pourquoi peut-il y avoir de la cohérence spatiale dans l'émission thermique ? ». Au retour de mon post doc, Jean-Jacques me lance sur le sujet et nous publions le premier article théorique en 99, démontrant le rôle des polaritons de surface dans la cohérence spatiale du champ proche thermique. Il y eut ensuite un autre article en 2022 avec la première preuve expérimentale de l'émission thermique cohérente en champ lointain. J'ai eu la chance de travailler sur ce sujet quelques années. Cette période était exaltante car nous avons ouvert un boulevard pour faire progresser notre compréhension de ce

phénomène fondamental. L'émission thermique cohérente est devenue depuis un sujet impliquant de nombreux groupes dans le monde.

### QUELS ONT ÉTÉ VOS PREMIERS PROJETS DE RECHERCHE ?

Durant ces années à Centrale Paris, j'ai partagé mes activités entre la nanophotonique et l'optique des milieux diffusants. Mes travaux en nanophotonique portaient sur l'émission thermique cohérente, la plasmonique, et le contrôle de l'émission de fluorescence de molécules uniques par des antennes optiques. En optique des milieux diffusants, nous avons développé des outils théoriques et numériques pour traiter des sujets fondamentaux ou des applications en imagerie de fluorescence. J'ai eu la chance d'avoir d'excellentes doctorantes et doctorants, dont Romain Pierrat qui a rejoint plus tard l'équipe montée à l'ESPCI et qui est aujourd'hui toujours un collègue très proche.

### QUELLES SONT LES RAISONS QUI VOUS ONT CONDUIT À REJOINDRE L'ESPCI ?

Au fil des années, en m'investissant progressivement dans l'optique des milieux complexes, je me suis retrouvé en connexion de plus en plus forte avec les collègues de l'ESPCI spécialistes de ces domaines, en particulier Mathias Fink et Claude Boccara. Ils m'ont parlé d'un projet de création d'un institut de recherche dédié à la physique des ondes, allant de l'acoustique à l'optique en passant par les micro-ondes. Ils cherchaient à renforcer l'aspect théorique et mon profil les intéressait. Je franchis le pas en 2007 en devenant professeur à l'ESPCI. Nous travaillons sur ce projet de création d'un nouveau laboratoire en 2008 et l'Institut Langevin est créé en 2009. Mathias Fink en est le directeur, Arnaud Tourin et moi en devenons les directeurs adjoints. C'était très intéressant car il s'agissait d'une aventure nouvelle en démarrant une équipe de recherche de zéro. Ce nouveau challenge a été très stimulant et m'a permis de construire quelque chose d'original avec une équipe de

théoriciens au milieu d'un institut rempli des meilleurs expérimentateurs. J'ai continué à mener en parallèle des recherches sur mes deux thématiques « historiques », mais au fil des années, l'optique des milieux complexes a pris le pas sur la nanophotonique. J'ai participé aux premières discussions sur l'aventure du contrôle du front d'onde en milieux complexes. Dès 2008 nous avons travaillé avec Sylvain Gigan, Claude Boccara, Geoffroy Lerosey et Mathias Fink sur ce projet de mesure de la matrice de transmission qui a été porté par Sylvain Gigan. Ce sujet a d'ailleurs pris beaucoup d'ampleur depuis. La communauté scientifique regardait ces résultats avec grand intérêt, car il était évident qu'il y avait un changement de paradigme.

### COMMENT IDENTIFIEZ-VOUS VOS SUJETS DE RECHERCHE ?

En tant que théoricien, j'aime beaucoup travailler avec des expérimentateurs qui osent se lancer dans des projets risqués et qui croient en des idées nouvelles apportées par des théoriciens. J'aime également beaucoup aller découvrir des choses nouvelles dans des vieux sujets. L'émission thermique cohérente en est un exemple. Un autre exemple concerne nos travaux plus récents sur les corrélations d'intensité entre les speckles réfléchis et transmis, menés avec Arthur Goetschy et Romain Pierrat dans le cadre de la thèse de Nikos Fayard. Je me pose encore la question de savoir pourquoi ces corrélations restaient inconnues, alors que les propriétés statistiques des figures de speckle ont été très étudiées depuis les années 80.

### VOUS VOUS ÊTES ÉGALEMENT BEAUCOUP IMPLIQUÉ DANS LA DIRECTION DE STRUCTURES DE RECHERCHE

Ma première véritable implication a été liée à l'aventure de l'Institut Langevin démarrée en 2008. Regrouper dans un même laboratoire des spécialistes de l'acoustique, de l'optique et des micro-ondes, et y associer des théoriciens représentait un projet très intéressant pour moi. Mais il fallait construire un

nouveau laboratoire et surmonter de nombreuses difficultés. Il était évident qu'autour de Mathias Fink et Claude Boccara il fallait une équipe resserrée, et Mickael Tanter, Arnaud Tourin et moi avons porté le projet avec eux. Plus tard, en 2014, lorsque Jean-François Joanny prit la direction de l'ESPCI, il m'a contacté afin que je prenne la direction de la recherche. Après avoir hésité (c'était un engagement fort), j'ai commencé comme conseiller dans son comité de direction, puis accepté la fonction de directeur de la recherche en 2015. J'ai toujours continué à mener, en parallèle des fonctions de direction, des activités de recherche et d'enseignement. Lorsqu'en 2019 le mandat de Jean-François Joanny s'achève, je décide d'arrêter la direction de la recherche, souhaitant souffler un peu et me concentrer sur mon travail d'enseignant-chercheur. A l'automne 2020, Alain Fuchs me demande de rejoindre l'équipe de l'Université Paris Sciences et Lettres (PSL) comme vice-président recherche. Tenté par ce nouveau défi je débute comme VP Recherche à PSL en janvier 2021. Ce fût une très belle expérience, et tout se passait très bien lorsque, sans que je m'y attende, le « search committee » de l'Institut d'Optique Graduate School (IOGS) me contacte fin 2021 et me convainc de me porter candidat au poste de directeur général. Il m'a semblé que cette fonction pouvait avoir beaucoup de sens pour moi, peut-être encore plus que le poste un peu « hors sol » de VP que j'occupais. J'ai donc postulé et j'ai été sélectionné par le conseil d'administration, pour prendre mes fonctions de directeur général de l'IOGS en juin 2022. Je mène depuis mes activités de professeur à l'ESPCI et de direction à l'Institut d'Optique avec beaucoup de plaisir et d'enthousiasme.

### QUE RETENEZ-VOUS DES LIEUX OÙ VOUS ÊTES PASSÉ ?

J'ai toujours évolué dans des lieux (Centrale, ESPCI, Institut d'Optique) où la connexion entre la recherche et les applications est forte, où la connexion entre le monde académique et ●●●

le monde de l'entreprise est naturelle. Cette culture n'est pas présente dans tous les lieux de recherche, et je me rends compte de la chance que j'ai eue d'évoluer dans des environnements décloisonnés ; décloisonnés d'un point de vue thématique, entre les sciences de l'ingénieur et la physique, entre la physique, la chimie et la biologie par exemple. Cette vision décloisonnée est, il me semble, une vision moderne de la recherche. Je n'utilise que très peu la terminologie dissociant recherche fondamentale et appliquée, les deux aspects se nourrissant l'un et l'autre, de manière réciproque. Si la recherche fondamentale peut donner des applications, il faut garder à l'esprit que les applications peuvent inspirer des recherches très fondamentales. Cette vision décloisonnée est aussi ce qui m'a motivé à prendre la direction de l'Institut d'Optique, car l'IOGS est conçu sur un modèle hybride, pensé pour faciliter les décloisonnements. Les pères fondateurs, Charles Fabry en premier lieu, ont défini dès 1920 le modèle de l'Institut d'Optique comme le mélange d'une école d'ingénieur, d'un centre de recherche, et d'un centre de transfert vers l'industrie. Toutes ces composantes, qui forment l'ESRI d'aujourd'hui, sont dans les gènes d'institutions comme l'ESPCI ou l'Institut d'Optique. A l'Institut d'Optique mon objectif est de profiter de ce modèle très pertinent, et surtout agile car de taille raisonnable, pour former encore mieux et encore plus d'ingénieurs qui contribueront à répondre aux grands enjeux qui sont devant nous, et à transférer le plus efficacement possible le fruit de nos recherches vers la société.

### COMMENT AVEZ-VOUS DÉVELOPPÉ VOS COLLABORATIONS INTERNATIONALES ?

Dans le parcours d'un chercheur, les rencontres sont déterminantes, au niveau national comme au niveau international, et une rencontre marquante fut celle avec Juan-José Sáenz (malheureusement décédé en 2020). Certains papiers que j'ai eu la chance de cosigner avec Juanjo font partie des plus

*Cette culture n'est pas présente dans tous les lieux de recherche, et je me rends compte de la chance que j'ai eue d'évoluer dans des environnements décloisonnés ; décloisonnés d'un point de vue thématique, entre les sciences de l'ingénieur et la physique, entre la physique, la chimie et la biologie par exemple. Cette vision décloisonnée est, il me semble, une vision moderne de la recherche.*

beaux papiers que j'ai pu écrire (ce qui ne veut pas dire qu'ils sont les plus cités). Ce qui m'a toujours plu dans notre collaboration, c'est que nous sommes parvenus à trouver un mode d'interaction où l'émulation était permanente et poussée à son paroxysme. Nous partageons un enthousiasme à la limite de l'explosif. Nous sommes allés à deux sur des sujets où nous nous ne serions jamais allés seuls. Il a très clairement influencé mes recherches, et même ma manière d'aborder les questions encore aujourd'hui. Je reste très connecté à la communauté photonique espagnole et c'est en grande partie son héritage.

Une autre rencontre importante a été celle avec John Schotland que j'ai rencontré en Chine lors d'un workshop de maths appliquées à Shanghai. Quelques années après, je l'ai invité à l'ESPCI pour un séjour de 2 mois. Il avait commencé à écrire quelques chapitres d'un potentiel livre sur l'optique diffuse. J'avais en tête de me lancer sur la rédaction d'un ouvrage sur une thématique similaire, peut-être avec un point de vue plus fondamental. Un jour, lors d'un déjeuner, il a émis l'idée de tenter de fusionner nos deux projets. Nous nous sommes donnés six mois pour converger vers une table des matières. Au bout de six mois, nous nous sommes lancés dans l'écriture, une aventure qui durera huit ans. Principles of Scattering and Transport of Light est paru en 2021, et les échos très positifs que nous recevons depuis sont une très grande satisfaction.

### LA TRANSMISSION DU SAVOIR ET DES CONNAISSANCES TIENT UNE PLACE ESSENTIELLE DANS VOS ACTIVITÉS

J'aime beaucoup l'idée de transmission, mêlée à la remise en question par la

confrontation aux apprenants. J'ai toujours enseigné, même lorsque j'ai été très occupé par des fonctions de direction (bien sûr avec un volume d'heures réduit, mais jamais négligeable). Il y a des sujets que j'ai appris parce que je les ai enseignés. L'enseignement a été comme une formation continue pour moi. Dans mon activité de chercheur, je porte une très grande attention aux cours que je présente aux écoles thématiques d'hiver ou d'été. Je sais l'importance de ces écoles dans la formation des futurs ou jeunes chercheurs, et dans l'orientation de leurs recherches. Certaines écoles auxquelles j'ai participé comme jeune chercheur ont été déterminantes pour moi. Un moment marquant de ma carrière fût l'école de 15 jours aux Houches organisée en 1998 sur les ondes en milieux complexes. C'est l'école qui a soudé au niveau international la communauté sur ce sujet. D'autres ont suivi à Cargèse. Il y a des cours de cette école 1998 dont je me souviens encore aujourd'hui très bien, et plusieurs personnes que j'ai côtoyées aux Houches ont influencé la suite de ma carrière.

Je voudrais souligner également la chance que j'ai eue, dans mon métier d'enseignant-chercheur, d'avoir toujours interagi avec des élèves ingénieurs, des doctorants et des post-doctorants formidables. Enseigner, superviser des travaux de recherche, transmettre les ficelles du métier, cela nous pousse aussi en avant car les plus jeunes nous stimulent toujours pour évoluer et être en démarche permanente de progrès. Mon travail de chercheur n'aurait pas le même sens sans être accompagné de cette mission de formation, de transmission, qui au bout du compte est un partage. ●



## TÉMOIGNAGE D'ENTREPRENEUR

### Loïc Henriet, Pasqal

**Spécialiste des systèmes quantiques en interaction, co-CEO de Pasqal, entreprise développant des processeurs quantiques à atome neutre.**

<https://doi.org/10.1051/photon/202513015>

#### POUVEZ-VOUS DÉCRIRE VOTRE PARCOURS, VOS TRAVAUX DE THÈSE ET DE POSTDOCTORAT, AVANT D'INTÉGRER PASQAL ?

J'ai commencé par suivre un parcours d'ingénieur à l'École polytechnique. C'est là que j'ai découvert la physique quantique. Cette discipline m'a tellement intéressé que j'ai décidé de poursuivre dans cette voie en intégrant un master 2 à l'École normale supérieure, dans le programme "Concepts fondamentaux de la physique" à Paris. Par la suite, j'ai hésité entre une thèse théorique pure et une thèse liée à l'expérimentation. Finalement, j'ai choisi de retourner à l'École polytechnique pour réaliser ma thèse au Centre de physique théorique. Mon travail portait sur des méthodes théoriques permettant de décrire la dynamique des systèmes quantiques en interaction, notamment les systèmes de spin. L'objectif était de décrire la dynamique de systèmes composés de nombreux systèmes à deux niveaux en interaction, en utilisant des méthodes numériques et théoriques exactes. Ce travail était déjà en lien avec l'informatique quantique, un domaine en plein essor à cette époque, notamment pour la simulation de circuits quantiques. Ensuite, j'ai effectué un post-doctorat à l'Institut des sciences photoniques à Barcelone pendant trois ans. Cette expérience m'a permis de me rapprocher davantage de l'expérimentation. J'étudiais les effets collectifs dans des systèmes atomiques en interaction avec la lumière, à l'échelle du photon unique ou de quelques photons. L'objectif était de comprendre

comment une collection d'atomes couplés à la lumière pouvait générer des effets émergents cohérents. Ce travail m'a donné l'opportunité de collaborer avec le groupe de recherche d'Antoine Browaeys et de Thierry Lahaye à l'Institut d'Optique, les cofondateurs académiques de Pasqal. Leur équipe était à la pointe du développement de machines capables de manipuler des atomes individuels et de les disposer à des positions arbitraires. Ces systèmes étaient utilisés aussi bien pour la simulation quantique que pour l'étude des interactions lumière-matière dans des ensembles de nombreux atomes. Il se trouve que mon travail post-doctoral était en lien direct en lien avec ces thématiques. En 2019, après trois ans de post-doctorat, cette proximité thématique et mon intérêt scientifique m'ont naturellement conduit à rejoindre Pasqal, dès la création de l'entreprise, au printemps de cette année-là.

#### QU'EST-CE QUI VOUS A MOTIVÉ À INTÉGRER UNE ENTREPRISE SI JEUNE ?

À l'issue de mon post-doctorat, j'avais envisagé plusieurs options : rester dans le monde académique, ce qui n'est pas évident avec la pénurie de financements et de postes ; intégrer un grand groupe industriel en R&D ; ou rejoindre une start-up. J'ai toujours été attiré par l'idée de travailler dans une start-up, et Pasqal représentait une combinaison idéale entre mon domaine de recherche, que je connaissais très bien et qui me passionnait, et l'aventure entrepreneuriale. Ce choix a aussi été influencé par les personnes avec qui je travaillais. Je

connaissais bien Antoine et Thierry, et je m'entendais très bien avec Christophe, Georges, Adrien et Lucas les autres membres de l'équipe initiale de Pasqal.

#### QUELLES ONT ÉTÉ VOS PREMIÈRES MISSIONS AU SEIN DE PASQAL ?

Comme je n'avais pas d'expérience expérimentale sur la plateforme, j'ai d'abord contribué en tant qu'assistant sur certaines tâches pratiques, ce qui m'a permis de mieux comprendre le fonctionnement du système. Ensuite, j'ai principalement travaillé sur trois volets : comprendre et modéliser le fonctionnement de la machine, développer des couches logicielles bas niveau pour la piloter, et explorer les applications possibles de cette technologie.

#### POUVEZ-VOUS EXPLIQUER LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU PROCESSEUR QUANTIQUE DÉVELOPPÉ ?

Les processeurs quantiques à atomes neutres reposent sur une technologie développée à l'Institut d'Optique pendant les vingt dernières années, ainsi que dans d'autres laboratoires ayant adopté des approches similaires. Nous utilisons des atomes individuels que nous plaçons dans une enceinte à ultra-vide, avec une pression de l'ordre de  $10^{-11}$  millibars. Nous utilisons des atomes de rubidium, que nous refroidissons et piégeons à l'aide de pinces optiques. Ces pinces sont des faisceaux laser très focalisés permettant de maintenir les atomes immobiles à des positions précises dans l'espace. Ainsi, nous pouvons ●●●

former des réseaux de dizaines, voire de centaines d'atomes.

### **ET COMMENT CRÉEZ-VOUS LES QUBITS AVEC CES ATOMES ?**

Nous utilisons un système laser pour isoler deux niveaux électroniques particuliers des atomes de rubidium et générer des transitions entre ces niveaux. Un de ces niveaux représente l'état 0 du qubit et l'autre l'état 1. L'information quantique est ainsi encodée et manipulée.

### **COMMENT L'INTRICATION EST-ELLE CRÉÉE ENTRE CES QUBITS ?**

Nous exploitons une interaction native entre les atomes lorsqu'ils sont excités dans un état de Rydberg, où leur électron est très éloigné du noyau. Cette interaction dipôle-dipôle de type Van der Waals permet d'engendrer une intrication entre les atomes. Pour la lecture, nous utilisons une technique de mesure par fluorescence. Un système d'imagerie collecte la lumière émise par les atomes sur une caméra CCD, ce qui permet d'obtenir les informations nécessaires sur leur état.

### **COMMENT FONCTIONNE L'INTERFACE ET SUR QUELS ALGORITHMES REPOSENT CES NOUVEAUX CALCULATEURS ?**

Il y a deux sujets principaux ici : d'une part, l'accessibilité et la pile logicielle, et d'autre part, les algorithmes. Sur l'algorithme, la logique de l'algorithme quantique est fondamentalement différente de celle des algorithmes classiques. Elle est plus riche, ce qui implique le développement de nouveaux algorithmes et routines de calcul. Il existe donc des langages et des méthodes pour décrire ces algorithmes, qui ont émergé au cours des dernières années. En revanche, la pile logicielle reste assez standard. En général, les gens utilisent des bibliothèques Python, qui sont des points d'accès standards, utilisables par tous. Grâce à ces bibliothèques, il est possible de créer des algorithmes quantiques. Ces derniers, qui reposent sur cette nouvelle logique, sont ensuite envoyés *via*

le cloud, en utilisant des technologies de cloud computing standards. Ainsi, il y a deux aspects à considérer : l'aspect « accessibilité logiciel », qui reste classique dans son approche, et l'aspect « algorithmique », où les algorithmes quantiques ont des spécificités.

### **QUELLES ONT ÉTÉ LES PRINCIPALES ÉTAPES DE DÉVELOPPEMENT DE L'ENTREPRISE DEPUIS SA CRÉATION EN 2019 ?**

La première étape a consisté à reproduire ce qui existait déjà dans les laboratoires académiques. Nous avons pris une machine existante en laboratoire et nous avons essayé de la reproduire dans un autre contexte. Nous n'avons rien changé au design, nous avons simplement cherché à le faire plus rapidement. La première machine a donc été une réplique de celle des laboratoires. Cela a permis de montrer que nous étions capables de faire cela dans un environnement autre que celui d'un laboratoire de recherche.

Ensuite, nous avons entamé une première phase d'industrialisation. Nous avons fiabilisé certains systèmes, réécrit le code de contrôle et mis cette machine sur le cloud. À ce moment-là, elle était encore chez nous, mais nous avons rationalisé certains éléments pour les rendre plus fiables et répliquables. En laboratoire, les bancs optiques sont souvent construits de manière ouverte, permettant de les modifier selon les besoins. Cela favorise l'expérimentation et la recherche. Nous, en revanche, savions exactement ce que nous voulions faire, ce qui nous a permis de limiter les degrés de liberté et d'aboutir à des éléments plus fiables.

Maintenant, nous sommes dans une phase où nous pouvons produire des machines en parallèle, y compris en pré-série. Ces machines sont fabriquées par des personnes qui n'ont pas de formation en physique quantique. Cela montre l'évolution de notre capacité d'industrialisation : nous ne dépendons plus de notre expertise pour construire ces machines et pouvons en produire plusieurs simultanément.

### **EN TERMES DE CROISSANCE ORGANIQUE, Y A-T-IL EU DES ÉTAPES PARTICULIÈRES ?**

Tout à fait. En tant que start-up, notre objectif est de croître rapidement et de nous concentrer sur notre domaine. Nous avons rapidement passé le cap de quelques personnes à une équipe d'une vingtaine, voire une trentaine de personnes, principalement techniques. Cela nous a permis de réaliser les premières démonstrations avec des clients intéressés par nos machines, ce qui a facilité notre levée de fonds. En janvier 2023, nous avons levé 100 millions d'euros, ce qui a marqué une phase importante de croissance pour accélérer notre développement industriel et augmenter notre capacité à produire des machines et à travailler avec un nombre plus important de clients.

Aujourd'hui, nous sommes 320 personnes, réparties entre la région parisienne (à Palaiseau), une équipe à Amsterdam pour le développement des algorithmes, et une présence en Amérique du Nord, au Québec.

### **VOUS VOUS ÊTES INTERNATIONALISÉS EN QUELQUES ANNÉES, QUELLES SONT LES RAISONS DE CE CHOIX ?**

Il y a eu plusieurs opportunités à l'international, et l'Amérique du Nord, notamment le Canada et le Québec, a été un point d'entrée naturel pour nous. Nous avons déjà des liens avec l'université de Sherbrooke dans le cadre de partenariats académiques, ce qui a facilité notre implantation là-bas pour y développer notre deuxième centre hardware.

L'équipe à Amsterdam a été mise en place après l'acquisition d'une entreprise spécialisée dans le développement d'algorithmes quantiques, juste avant notre levée de fonds. Cette acquisition nous permet d'avoir une solution complète allant du hardware à l'applicatif. Il est important pour nous de rester en contact direct avec les utilisateurs, et cela nécessite que nous développons des algorithmes

quantiques spécifiques à nos machines. Cela nous permet de mieux comprendre leurs besoins et d'accélérer notre développement. C'est pourquoi nous avons l'impératif de couvrir l'intégralité de la pile logicielle, du qubit à l'applicatif.

### **AVEZ-VOUS DES COLLABORATIONS AVEC LE MONDE ACADÉMIQUE ?**

Oui, tout à fait. Avec le monde académique, nous avons des liens très forts, car c'est vraiment une approche complémentaire au développement de technologies dans l'informatique quantique. Nous avons vocation à construire et industrialiser des produits, tandis que le monde académique explore des pistes plus risquées, mais qui peuvent potentiellement aboutir à des ruptures technologiques plus fortes. Nous avons donc de nombreuses collaborations académiques, et les plus fortes sont en France, notamment avec l'Institut d'Optique. Nous sommes en phase de création d'un laboratoire commun entre l'Institut d'Optique, le CNRS, l'Université Paris-Saclay et Pasqal. Ce laboratoire est une entité qui rassemble des moyens et des personnes provenant de chaque côté : des personnes de chez Pasqal, du matériel provenant de chez Pasqal, et de l'autre côté des thésards, des post-docs et des chercheurs, tous travaillant dans une structure commune sur des projets qui sont à la convergence de nos intérêts et de ceux de l'Institut d'Optique et des groupes de recherche.

Nous bénéficions évidemment du travail fait dans ce laboratoire de recherche, mais dans l'autre sens, cela fonctionne aussi. Quand nous fiabilisons ou développons une nouvelle brique technologique et que celle-ci retourne dans le laboratoire, cela permet de bénéficier d'une plus grande puissance d'ingénierie pour explorer de nouveaux phénomènes. Nous constatons également un retour en termes de performance du côté du laboratoire académique. C'est donc une relation très fructueuse. Nous avons

d'autres collaborations académiques, notamment avec le LKB à Paris, ainsi que d'autres relations en France et en Europe avec des acteurs universitaires comme l'INRIA, le CEA, et des laboratoires CNRS.

### **COLLABOREZ-VOUS AVEC LES AUTRES ACTEURS INDUSTRIELS DE CETTE AVENTURE INDUSTRIELLE LIÉE AU QUANTIQUE ?**

Oui, nous collaborons avec plusieurs entreprises, par exemple Qubit Pharmaceuticals, qui travaille sur la découverte de nouveaux médicaments à l'aide de l'informatique quantique, ainsi qu'avec WeLinq, qui développe une mémoire quantique à base de rubidium, pour voir comment nous pourrions interconnecter des processeurs quantiques sur le long terme. À l'international, nous collaborons avec d'autres start-ups et grands groupes, comme IBM. Ce dernier est une figure historique de l'informatique quantique, ayant été l'un des premiers à mettre un ordinateur quantique sur le cloud, avec une technologie de qubits supraconducteurs. Nous travaillons avec eux sur l'élaboration d'interfaces communes entre nos processeurs et leurs processeurs. De nombreux fournisseurs de matériel quantique développent leur propre méthode de programmation pour un processeur quantique. Nous pensons qu'il est contre-productif de multiplier ces différentes approches et qu'il serait plus efficace de simplifier l'accès pour les utilisateurs, afin que, lorsqu'un utilisateur utilise un processeur quantique IBM, il puisse choisir plus tard d'utiliser un processeur Pasqal sans que cela soit trop contraignant. Nous avons donc tout intérêt à fédérer l'écosystème en simplifiant les interfaces, et nous travaillons avec IBM pour élaborer un ensemble d'interfaces communes entre nos technologies et les leurs.

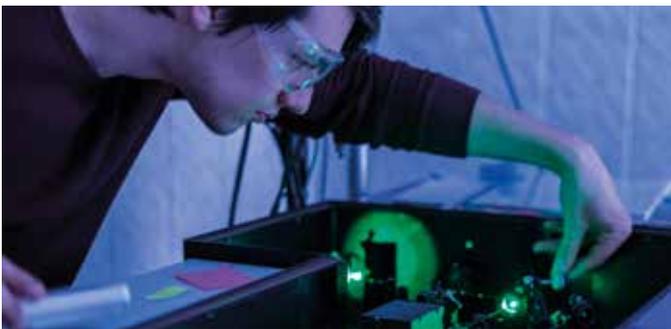
### **QUELLES SONT LES PERSPECTIVES EN TERMES DE PERFORMANCES DES CALCULATEURS ?**

### **AVEZ-VOUS UN CALENDRIER DE DÉVELOPPEMENT À L'HORIZON DE 3 OU 10 ANS ?**

Oui. En termes de performance, nos machines sont encore imparfaites, elles comportent des erreurs, mais nous pouvons travailler sur les métriques: le nombre de qubits, la qualité des opérations et le taux de répétition, afin d'améliorer ces machines pour les rendre plus performantes. Nous avons une roadmap assez agressive en termes de développement technologique, car il y a encore beaucoup de gains à engendrer. Par exemple, notre taux de répétition actuel est de l'ordre de 5 Hz, c'est-à-dire 5 opérations par seconde, mais avec quelques optimisations, nous pouvons atteindre le kHz. Il n'y a pas de barrière physique pour y parvenir. Nous avons des objectifs assez ambitieux en termes de performance, et nous travaillons pour les atteindre dans les 3 à 5 prochaines années. À terme, nous pourrions avoir des machines capables de réaliser des centaines de Hz avec une fidélité des opérations à 99,9%. Ce seraient des machines très performantes, mais elles ne seraient toujours pas capables d'implémenter les algorithmes de Shor ou de Grover, qui ont été développés dans les années 1990 et qui auront un impact économique majeur. Pour implémenter ces algorithmes, nous avons besoin de mettre en place des codes de correction d'erreurs. La correction d'erreurs quantiques est un défi majeur, car mesurer un système quantique le détruit et il est impossible de copier un système quantique (selon le théorème de No-Cloning). Cela rend la correction d'erreurs très difficile. Des solutions existent, mais elles nécessitent beaucoup de ressources, en termes de nombre de qubits et d'opérations. Nous avons donc une roadmap à plus long terme pour développer des ordinateurs quantiques tolérants aux fautes, capables de corriger activement les erreurs. Notre objectif à l'horizon 2031-2033 est d'avoir un ordinateur quantique tolérant aux fautes, capable d'implémenter ces algorithmes très impactants. ●

# Former pour innover : évolution de l'offre de formation en photonique en France

**Face à une industrie en pleine expansion et en constante mutation pour intégrer les évolutions technologiques rapides du domaine de la photonique, l'offre de formation en optique et photonique évolue également. Cette offre est particulièrement bien structurée en France et permet de former des opérateurs, des techniciens, des techniciens supérieurs, des ingénieurs et des docteurs en optique et photonique afin de répondre aux besoins croissants en compétences spécialisées. Cet article vise à dresser un panorama des évolutions récentes ou en cours dans la formation des futurs spécialistes de la photonique.**



<https://doi.org/10.1051/photon/202513018>

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.

**Nathalie Destouches\*** avec le concours de **Renaud Bachelot, Raphaël Clerc, Jean-Jacques Simon**,  
La SFO, Photonics France, iXCampus  
\*[nathalie.destouches@univ-st-etienne.fr](mailto:nathalie.destouches@univ-st-etienne.fr)

**L**e paysage éducatif français en photonique est riche et diversifié. On compte une centaine de formations en photonique. Sous l'impulsion de la filière, un nouveau baccalauréat professionnel Optique Photonique : Technologies de la Lumière a été créé en 2023 et a ouvert dans 4 lycées en 2024, en attendant d'autres ouvertures en 2025 et 2026. Pour harmoniser les diplômes, le référentiel du BTS Systèmes photoniques a été révisé pour donner naissance au BTS Photonique : Technologies et Sciences de la lumière délivré dans une dizaine d'établissements. On compte également 32 BUT Mesures Physiques qui proposent des enseignements en optique et photonique, 10 licences professionnelles Photoniques, une cinquantaine de masters et d'écoles d'ingénieurs spécialisées, réparties entre grandes écoles et universités et des formations continues à tous les niveaux, permettant la montée en compétences des professionnels. Selon Photonics France, on compte environ 1000 diplômés par an dans le domaine de la photonique.

## Croissance du marché et diversité des niveaux de compétences recherchés

Le secteur de la photonique en France connaît une croissance rapide et soutenue. Actuellement, il emploie près de 90 000 personnes, et les projections indiquent un besoin de 8 000 nouveaux emplois par an d'ici 2025, selon Photonics France. Cette expansion reflète non seulement l'innovation et le développement industriel constant du domaine (environ 10% de croissance), mais aussi son importance stratégique pour l'économie française et européenne.

Les perspectives d'embauche sont particulièrement favorables pour les diplômés. 47% des titulaires de BTS en photonique et près de 100% des diplômés de niveau Bac+5 (masters et ingénieurs) trouvent un emploi dans les six mois suivant l'obtention de leur diplôme. La répartition des besoins annuels par niveau d'étude (Figure 1) met en lumière la diversité des opportunités professionnelles offertes.

## Nouveaux défis technologiques et besoins en compétences

Selon le rapport « Toward a better Future » de Risto Linturi [1], la photonique contribue directement à 39% des technologies dites « radicales » indispensables pour atteindre les objectifs de développement durable des Nations Unies. Des télécommunications à la santé, en passant par l'énergie et la défense, ses applications sont omniprésentes. Les avancées technologiques exigent désormais des compétences pluridisciplinaires. Il est essentiel de travailler en équipes multidisciplinaires associant la photonique à de nombreuses autres disciplines telles que l'intelligence artificielle, les micro-nanotechnologies, la robotique, l'électronique, l'imagerie computationnelle ou la réalité virtuelle. De plus, les technologies quantiques constituent un domaine en plein essor qui nécessite la formation d'experts qui pourront exploiter pleinement leur potentiel en photonique. Pour accompagner ces mutations, il est essentiel de développer des formations adaptées qui pourront fournir du personnel qualifié aguerri aux nouvelles technologies, à l'interdisciplinarité et sensibilisé aux enjeux environnementaux et sociétaux.

## Les formations pré-bacs : préparer les opérateurs et techniciens de demain

### Le Baccalauréat Professionnel « Optique Photonique : Technologies de la Lumière »

Jusqu'à récemment, aucun cursus avant le Bac+2 n'était spécifiquement dédié à la photonique. Le nouveau Bac Pro "Optique Photonique : Technologies de la Lumière", lancé en septembre 2024, est venu combler cette lacune en proposant une formation dès la classe de seconde. Ce cursus de trois ans inclut 20 semaines de formation en milieu professionnel, offrant aux élèves une expérience pratique et une immersion dans le monde professionnel.

Les métiers visés par ce bac pro sont ceux de technicien de fabrication en optique de précision, de monteur-régleur, d'opérateur laser et de technicien de maintenance. Les besoins en recrutement dans ces domaines sont estimés à environ 1 000 postes par an et ce Bac Pro est également destiné à servir de levier de recrutement pour le BTS Photonique : Technologies et Sciences de la lumière, nouvellement renommé et réformé pour donner suite au Bac Pro. Quatre lycées ont ouvert cette formation en 2024 : Félix Le Dantec à Lannion, Victor

**Figure 1.** Répartition des offres d'emploi en photonique en France selon des statistiques récentes diffusées par Photonics France et niveau d'étude correspondant.



### Bac Pro Optique Photonique : Technologies de la Lumière

Ouverts en 2024  
Ouverture prévue en 2025



**Figure 2.** Lycées ayant ouvert ou prévoyant l'ouverture d'un Bac Pro Optique Photonique : Technologies de la Lumière.

Bérard à Morez, Alfred Kastler à Talence et Edouard Branly à Châtellerault. Plusieurs préparent leur ouverture en 2025 : Lycée International de Palaiseau, Vaucanson à Tours, Branly à Lyon, Vaucanson à Grenoble, et d'autres lycées sont en réflexion en 2026, avec l'ambition d'une vingtaine de classes d'ici cinq ans (Figure 2). Ce déploiement massif vise non seulement à répondre aux besoins croissants du secteur en main-d'œuvre qualifiée, mais aussi à offrir aux jeunes de nouvelles opportunités d'orientation vers des métiers d'avenir dans la photonique.

### Les Écoles de Production

Créées en 1882, les écoles de production sont des établissements techniques qui s'adressent aux jeunes de 15 à 18 ans, basés sur le concept pédagogique du "faire pour apprendre". Dans ce modèle immersif, les élèves consacrent deux tiers de leur temps à réaliser de véritables commandes pour des clients réels, industriels ou particuliers, tout en préparant un diplôme de baccalauréat professionnel. Cette approche pratique favorise l'insertion professionnelle en offrant aux étudiants une expérience concrète du monde du travail et des compétences directement applicables.

iXcampus prévoit l'ouverture d'une école de production dédiée à la photonique à Saint-Germain-en-Laye, bénéficiant de plateaux techniques partagés. Cet établissement offrira aux élèves un environnement d'apprentissage moderne, équipé d'infrastructures de pointe, permettant de se former aux technologies photoniques les plus récentes. Ce projet ●●●

est encouragé par la région Île-de-France et reconnu par l'État, témoignant de l'importance accordée à ce modèle pédagogique pour répondre aux besoins du secteur industriel.

### Le BTS Photonique : Technologies et Sciences de la Lumière

Cette formation de deux ans, révisée en 2024, prépare les étudiants à devenir des techniciens spécialisés dans la conception, la réalisation et la maintenance de systèmes photoniques. Le programme est structuré autour de quatre blocs de compétences : la conception durable de systèmes optiques photoniques, le prototypage et l'industrialisation, le contrôle et la métrologie, ainsi que l'assistance technique et la maintenance. Les étudiants acquièrent des connaissances approfondies en formation des images, lasers, radiométrie, colorimétrie, liaisons par fibre optique, et composants optoélectroniques. La

formation met l'accent sur la pratique, incluant des stages en milieu professionnel, et développe des compétences en communication technique et en anglais, essentielles dans ce secteur. Les diplômés peuvent intégrer divers secteurs tels que la défense, les télécommunications, les transports ou la santé, en tant que techniciens en optique de précision. Des poursuites d'études sont possibles, notamment en licence professionnelle ou en classe préparatoire ingénierie industrielle pour entrer en école d'ingénieur. La réforme opérée a pour objectif d'aligner les référentiels de compétences du nouveau Bac Pro avec ce BTS, de modifier les périodes de stages pour répondre mieux aux besoins des industriels et enfin d'être plus attractif auprès des jeunes notamment dans Parcoursup. En effet le BTS, comme la majorité des formations professionnalisantes dans le domaine industriel souffre d'un manque de visibilité et d'attractivité. Les effectifs baissent de manière

**Le Bac Pro « Optique Photonique : Technologies de la Lumière »** s'inscrit dans une dynamique nationale visant à renforcer l'attractivité des formations scientifiques et technologiques tout en répondant aux besoins d'un secteur en pleine croissance.

Le programme pédagogique du Bac Pro est conçu pour initier les élèves aux principes fondamentaux de l'optique et de la photonique, tout en leur permettant de maîtriser des compétences techniques adaptées aux besoins industriels. Les principales thématiques abordées sont listées en figure 3.



Figure 3. Principales thématiques abordées.

Les compétences visées par le Bac Pro s'articulent autour de quatre grands pôles d'activité, chacun correspondant à un bloc de compétences spécifiques (Figure 4). Ces pôles couvrent l'ensemble du cycle de vie des composants et systèmes optiques photoniques, de leur fabrication à leur maintenance.

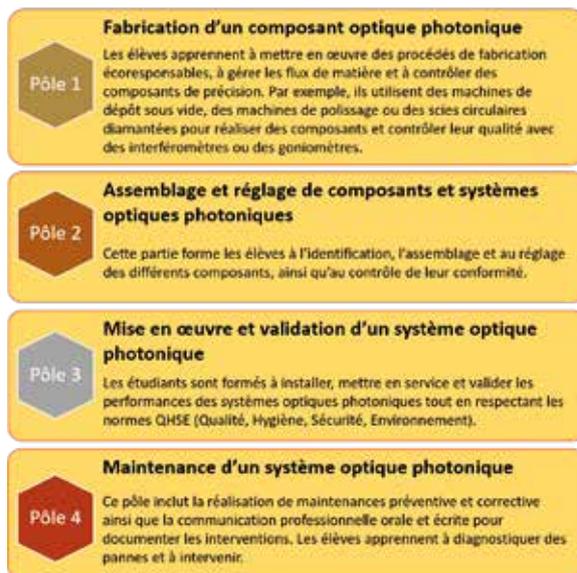
En intégrant des partenariats étroits avec des entreprises de pointe, le Bac Pro établit un lien direct entre les apprentissages scolaires et les besoins concrets du marché. Les stages en entreprise permettent aux élèves d'acquérir une expérience significative, tout en développant des compétences en résolution de problèmes, travail en équipe et adaptabilité à un environnement technique en évolution constante.

Les débouchés de cette formation sont variés et répondent à une demande croissante de professionnels qualifiés. Parmi

les métiers ciblés figurent les postes d'opérateur laser, de technicien de maintenance et de technicien de fabrication en optique de précision. Ce Bac Pro constitue un tremplin idéal pour une insertion professionnelle rapide. Sa mise en œuvre requiert toutefois la formation d'enseignants spécialisés en photonique.

Avec son implantation dans des régions stratégiques, le Bac Pro « Optique Photonique : Technologies de la Lumière » entend également jouer un rôle majeur dans le dynamisme économique local. En favorisant le développement d'une main-d'œuvre qualifiée et en incitant les jeunes à se tourner vers des métiers d'avenir, cette formation constitue une réponse concrète aux besoins de recrutement des entreprises du secteur, tout en valorisant le savoir-faire français dans les technologies de pointe.

Figure 4. Les quatre grands pôles d'activité du Bac Pro.



## PHOTONHUB : UN ÉCOSYSTÈME POUR BOOSTER FORMATIONS ET START-UP EN PHOTONIQUE EN ÎLE-DE-FRANCE

Lauréats du programme France 2030 « Compétences et Métiers d'Avenir », iXcampus, l'Institut d'Optique Graduate School et l'Université Paris Saclay ont pour ambition à travers le projet « Photon Hub » de créer un écosystème académique et industriel intégré en Ile-de-France pour promouvoir nos métiers et développer les compétences nécessaires à la croissance de notre industrie. Le projet, soutenu par la communauté d'agglomération Saint Germain Boucles de Seine, la Région académique Ile-de-France et par des industriels engagés (Figure 5) vise :

- La création d'un continuum de formation en photonique sur les territoires de Paris-Saclay (91) et de Saint-Germain-en-Laye (78). Par la création de nouvelles formations et le renforcement de formations existantes, le projet propose une offre unique allant du bac professionnel au doctorat.

- La transposition de l'ensemble de ces formations initiales en bloc de compétences et la création d'une offre de formations continues assurant la montée en compétence et la reconversion de salariés vers les métiers d'opérateurs de production, de techniciens spécialisés et d'ingénieurs en photonique.

- La création d'un programme d'accélération de start-up en photonique. Pensé comme un véritable carrefour d'innovation et disposant de plateaux techniques lourds, l'accélérateur permettra le transfert d'expertises académiques et industrielles vers des entrepreneurs à la pointe de l'innovation.

À l'issue de la phase d'expérimentation d'une durée de 5 ans, les actions développées sur le périmètre francilien ont vocation à servir de preuve de concept en vue d'une déclinaison plus large sur le périmètre national.

**ESSILOR**  
MIEUX VOIR LE MONDE

**ST** life.augmented

**PASQUAL**

**exail**

**imagine** 

Figure 5. Liste des partenaires industriels soutenant le projet.

continue avec le risque de fermeture de certaines classes. Les rectorats, les lycées, les enseignants se mobilisent pour attirer les jeunes lycéens mais c'est un véritable défi pour notre filière. Les projets AMI CMA tels que Lumiform 2030, Photonhub, FPI AURA, et d'autres projets donnent l'espoir d'un rebond pour ces formations professionnelles nécessaires pour l'industrie de la photonique.

### Les BUT et les licences professionnelles avec spécialisation en optique et photonique

La réforme du Diplôme Universitaire de Technologie (DUT) a abouti à la création du **Bachelor Universitaire de Technologie (BUT)** en 2021. Elle visait à mettre en place une formation plus complète et professionnalisante en alignant les DUT sur le système LMD (Licence-Master-Doctorat) tout en intégrant les atouts de la licence professionnelle et en augmentant la proportion de bacheliers technologiques admis dans les Instituts Universitaires de Technologie (IUT). La formation, dont une grande partie est constituée d'enseignements en mode projet, inclut 22 à 26 semaines de stage et vise à répondre aux besoins du marché du travail.

Parmi les 24 spécialités de BUT, le BUT Mesures Physiques (MP) offre une formation universitaire généraliste à la fois théorique, pratique et technologique adaptée aux nouvelles technologies. Cette formation très générale, déployée sur le territoire national à travers 29 départements MP, permet une insertion professionnelle directe dans des secteurs très divers (énergie et énergies renouvelables, transports, matériaux, métiers de

son, environnement, biomédical, aéronautique ...) mais permet également d'accéder à de nombreux types de poursuites d'études. Le Programme National du BUT MP se distingue des autres BUT par son volume conséquent d'enseignement dédié à l'optique et à la photonique (optique géométrique et ondulatoire, propriétés optiques des matériaux, composants optiques et optoélectroniques...). Il donne ainsi accès à des écoles d'ingénieurs dont l'Institut d'Optique Graduate School, Télécom Saint-Étienne, l'ENSI de Caen, Phelma ... Cela représente plus de 1500 étudiants formés à BAC+3 chaque année dans le domaine de la photonique.

Il existe une dizaine de **Licences Professionnelles avec spécialisation en optique et photonique**, avec en particulier la mention Optique professionnelle (parcours Métiers de la vision) qui apporte des connaissances en optométrie (mesurer l'acuité visuelle, maîtriser le fonctionnement des instruments d'optiques de l'opticien) et en contactologie (savoir proposer, conseiller et guider dans un choix en lentilles de contact, connaître les méthodes de détection et d'analyse). Elle est dispensée par exemple à La Rochelle, à Nîmes, à Blois ou encore à l'Université de Lorraine et à l'ISO. Celle dispensée à l'IUT d'Aix Marseille propose un parcours Santé visuelle (SV) qui permet aux opticiens diplômés du BTS Opticien Lunetier d'accroître leurs compétences en examen de vue (réfraction), contactologie et basse vision afin de développer leur activité paramédicale en santé visuelle. D'autres licences professionnelles proposent des compétences variées pour l'instrumentation, la colorimétrie...

## Les Écoles d'Ingénieurs

Les écoles d'ingénieurs françaises jouent un rôle prépondérant dans la formation des experts qui deviendront les ingénieurs de demain. De nombreux établissements se distinguent par la qualité de leurs programmes et leur contribution à l'innovation dans le domaine de la photonique parmi lesquels : l'Institut d'Optique Graduate School (IOGS), l'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Caen (ENSI Caen), Télécom Physique Strasbourg, l'ENSSAT, Télécom Saint-Étienne, Polytech Paris-Saclay, CentraleSupélec, Centrale Méditerranée, Telecom Sud Paris ou Phelma. Les partenariats avec les entreprises et les laboratoires de recherche permettent aux étudiants de bénéficier d'une formation en adéquation avec les besoins du marché. Certaines de ces écoles pratiquent la formation par alternance ou apprentissage. Ces écoles jouissent d'une très bonne visibilité auprès des industriels français du secteur de la photonique.

## Les nouveaux Masters français de la photonique

De nombreux masters en photonique ont récemment révisé leurs programmes pour mieux répondre aux avancées technologiques et aux besoins croissants de compétences dans des domaines tels que les systèmes quantiques, les télécommunications, ou encore les applications médicales. Parmi ces programmes remaniés figurent : les parcours « Optique et Matière » (Sorbonne université), « Photonique » (Université de Rennes), « OPHO » (Université Claude Bernard Lyon 1), « Photonics, Complex and Quantum Systems » (Université de Lille), de différents masters « Physique fondamentale et applications », le parcours « Quantum, Light, Materials and Nano Sciences » de l'Université Paris-Saclay, le parcours « Photonique, Hyperfréquences et Systèmes de Communication » de l'Université de Montpellier, les parcours « Advanced Imaging and

Material Appearance » et « Photonics Engineering » du master « Optique Image Vision Multimedia » de l'Université Jean Monnet de Saint-Etienne.

L'offre de master en photonique s'est aussi diversifiée ces dernières années notamment avec la création de nouveaux masters au sein de Graduate Schools.

Le master de la Graduate School « Light Sciences & Technologies » (Light S&T) de l'Université de Bordeaux se distingue par son approche interdisciplinaire en photonique et technologies quantiques. Les étudiants bénéficient de cours mutualisés dans trois parcours spécialisés : Light, Matter and Interactions, Physical Chemistry and Chemical Physics, et Biophotonics and Neurotechnologies. Le master offre des doubles diplômes avec l'Institut d'Optique Graduate School et des universités étrangères comme l'Université de Tampere (Finlande) ou la Colorado School of Mines (États-Unis). Ce programme, entièrement enseigné en anglais, prépare les étudiants à des carrières internationales dans les industries photoniques et les technologies quantiques, tout en offrant des bourses d'excellence pour les candidats les plus méritants. Le master de la Graduate School "NANO-PHOT" à l'UTT propose une formation de 2 ans entièrement en anglais axée sur les sciences et technologies de la nano-optique et nanophotonique. La formation inclut des notions fondamentales (interaction lumière-matière multi échelle, nano-optique quantique, etc.), implique des aspects technologiques de pointe (matériaux avancés, nano fabrication, nano caractérisation,..) et confère aux étudiants une solide expérience de la recherche fondamentale ou appliquée. Les nombreux partenaires académiques et industriels en France et à l'étranger permettent aux étudiants de se constituer un réseau professionnel international.

## LUMIFORM 2030 : UN PROJET NATIONAL POUR RENFORCER LA FORMATION EN PHOTONIQUE DU BAC AU BAC+3

Ce projet en cours d'évaluation par l'AMI Compétences et Métiers d'Avenir est conçu pour avoir une portée nationale et pour venir compléter des initiatives locales telles que Photon Hub ou TALENTS Photonique. Il vise à répondre aux besoins croissants de personnels qualifiés dans la photonique, en aidant à structurer et développer les formations du BAC au BAC+3 et en attirant plus de candidats vers ces formations. Pour ce faire, il repose sur deux piliers :

- Soutenir la formation et la conversion thématique des enseignants vers la photonique avec la mise à disposition d'outils pédagogiques mutualisés (LightBox Pro, kits laser, modules d'e-learning, logiciel SHIRE) et le partage de bonnes pratiques ;
- Améliorer la visibilité de la filière photonique auprès des jeunes élèves, de leurs parents et des enseignants du primaire et du secondaire pour favoriser les candidatures. Cela repose sur des actions de communication ambitieuses

lors d'événements d'orientation et d'actions de terrain. Ces actions incluent l'utilisation des tiers-lieux, des concours et le déploiement de la LightBox, un kit pédagogique de photonique, largement diffusé par la SFO depuis 2021 [2], pour sensibiliser jeunes et enseignants à la photonique en développant les liens entre les enseignants du primaire et du secondaire, les acteurs associatifs et les chercheurs et enseignants-chercheurs.

LUMIFORM 2030 s'appuie sur un large partenariat incluant ALPhANOV, LYNRED, Oxsius, Photonics France, SEDI ATI Fibres Optique, SFO, Thales AVS, et a reçu le soutien d'une trentaine d'entreprises, de nombreux enseignants de tous niveaux, de plusieurs régions académiques et de l'association Atouts Sciences. En complément des initiatives locales, ce projet contribuera à disséminer les bonnes pratiques sur tout le territoire national.



**L eFigure 6.** Liste des masters Erasmus Mundus avec partenaires français actuellement financés par l'Union Européenne.

projet QuantEdu-France est un programme national, décliné en divers sites labélisés. Il propose également des formations de master innovantes et interdisciplinaires, conçues pour répondre aux besoins des technologies quantiques. Ces programmes visent à former des étudiants capables de combiner des compétences en physique, en ingénierie et en informatique, tout en les préparant aux défis technologiques et industriels du secteur. Une analyse plus approfondie de ces formations sera présentée dans un article dédié d'un prochain numéro.

### Les Masters Conjointes Erasmus Mundus en photonique en France : Excellence et International

Ces programmes d'excellence sont hautement compétitifs et reconnus pour leur qualité académique. Ils proposent des programmes conjoints dispensés par des consortiums d'universités majoritairement européennes mais pouvant également être ouverts aux universités du monde entier depuis l'édition 2024 des EMJM (Erasmus Mundus Joint Master). Ils accueillent une majorité d'étudiants internationaux dont les plus méritants bénéficient de bourses attractives favorisant les candidatures des meilleurs étudiants à travers le monde. Les étudiants changent d'université chaque semestre et ont l'opportunité d'étudier dans plusieurs pays, découvrant différentes cultures et systèmes éducatifs en immersion complète et développant leurs capacités d'adaptation. Le fort réseau partenarial tant académique qu'industriel des EMJM du secteur de la photonique permet d'offrir une formation en lien étroit avec les innovations industrielles récentes et l'état de l'art de la recherche en photonique. Les étudiants apprennent également à travailler en équipe multiculturelle, à communiquer efficacement et à développer des approches pluridisciplinaires pour la résolution de problèmes. Les universités françaises sont partenaires ou coordinatrices

de 7 programmes EMJM actuellement financés par l'Union Européenne pour une durée de cinq ans dans le domaine de la photonique (Figure 6).

### La formation tout au long de la vie

La formation continue de l'Institut d'Optique Graduate School (IOGS) offre des programmes de haut niveau scientifique, s'appuyant sur l'expertise de ses chercheurs et enseignants-chercheurs, ainsi que sur leurs collaborations. Chaque année, environ 250 personnes bénéficient de ces formations, qui incluent toujours une mise en application pratique sur des logiciels ou des expériences. Le catalogue propose une trentaine de stages dans des domaines très divers (concepts de base, conception optique, infra-rouge, polissage, lasers ...) mais plus de 50 % des stages réalisés sont conçus sur mesure pour répondre aux besoins spécifiques des clients. Parmi les nouveautés, l'IOGS propose des formations dans les domaines de l'intelligence artificielle, des technologies quantiques et de la cryptographie (classique et post-quantique). Dans les années à venir, l'institut prévoit de mettre en place des formations certifiantes.

Le centre de formation PYLA, désormais intégré à ALPhANOV, propose un catalogue riche de plus de 60 formations courtes dans les domaines de la photonique et de l'électronique hyperfréquences, qui s'adressent à un public varié, des opérateurs aux chercheurs, en passant par les ingénieurs et techniciens. Les formations, alliant théorie et pratique, sont dispensées par des experts issus de laboratoires, universités et entreprises partenaires. Adaptables aux besoins spécifiques, elles peuvent être conçues sur mesure et organisées sur différents sites (Bordeaux-Talence, Bordeaux-Le Barp, Limoges, Paris) ou directement chez le client. Accessible aux personnes en situation de handicap, PYLA innove également avec des outils pédagogiques tels que l'Immersive Photonics Lab et des solutions de formation en ligne.

### Conclusion

L'offre de formation en photonique en France évolue continuellement pour répondre aux besoins d'un secteur en pleine expansion, grâce à une collaboration étroite entre institutions académiques et acteurs industriels. L'innovation des programmes et la mutualisation des ressources permettent à la France de se positionner au cœur de la dynamique internationale en photonique, en formant des professionnels à tous les niveaux d'études, des opérateurs aux docteurs, pour relever les défis de l'industrie et de la recherche. ●

### RÉFÉRENCES

- [1] [https://www.researchgate.net/publication/355377816\\_Towards\\_a\\_Better\\_Future](https://www.researchgate.net/publication/355377816_Towards_a_Better_Future)
- [2] Photoniques **127**, 27 (2024) <https://doi.org/10.1051/photon/20412727>

# Le réseau REFIMEVE : le temps et la fréquence de haute performance à la portée de tous

**Christian CHARDONNET\***

Directeur de l'Infrastructure de Recherche REFIMEVE

Laboratoire de Physique des Lasers, UMR 7538 CNRS/Université Sorbonne Paris Nord, Villetaneuse

\* [chardonnet@univ-paris13.fr](mailto:chardonnet@univ-paris13.fr)



**Nous présentons ci-dessous comment des développements photoniques des années 2000 qui ont permis de transporter par fibre optique des signaux d'horloges avec une erreur résiduelle inférieure à  $10^{-19}$  sont en passe de révolutionner des domaines bien au-delà de la métrologie. Le réseau REFIMEVE reposant sur cette technologie dessert aujourd'hui 30 laboratoires en France et assure le lead d'un projet d'infrastructure européenne appelé FOREST. L'impact concerne la physique fondamentale, l'astrophysique, la physique des hautes énergies, les sciences de la Terre et de l'environnement mais les impacts sociétaux promettent d'être très nombreux.**

<https://doi.org/10.1051/photon/202413024>

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.

## Contexte général

La société est devenue extrêmement dépendante des services PNT (Positioning, Navigation and Timing) fournis par les systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS – Global Navigation Satellite System), tels que le GPS américain et le système européen Galileo. Ces services sont rendus possibles par des horloges atomiques à bord de satellites, qui leur permettent de transmettre des messages temporels de grande précision. Malgré leurs performances et leur impact,

les GNSS sont un frein à de nouvelles innovations. Les performances actuelles des GNSS sont un facteur limitant en radioastronomie et pour les réseaux quantiques. Elles ne permettent pas une redéfinition de la seconde basée sur des horloges optiques qui atteignent des exactitudes relatives de  $10^{-18}$  ! En outre, les services GNSS peuvent être totalement perdus en raison de causes naturelles (par exemple une éruption solaire) ou d'un brouillage accidentel ou intentionnel. Une panne des GNSS pourrait avoir des

effets désastreux sur l'économie<sup>1</sup> et les infrastructures vitales, ce qui a incité les législateurs (y compris la Commission européenne) à rechercher des solutions alternatives. Une technologie candidate particulièrement prometteuse est la distribution du temps et de la fréquence par des réseaux de fibres optiques, qui pourrait transformer les réseaux

<sup>1</sup> Une étude a estimé qu'une panne de GNSS de 7 jours pourrait coûter 7644 millions de livres sterling à l'économie britannique.

de télécommunications existants en systèmes terrestres pour les services PNT au-delà du GNSS, la détection sismique à grande échelle, l'amélioration de la radioastronomie, la communication quantique et les nouvelles disciplines de recherche « en réseau ». L'infrastructure de recherche REFIMEVE et, à l'échelle européenne, le projet FOREST visent à concrétiser cette vision.

**Contexte historique**

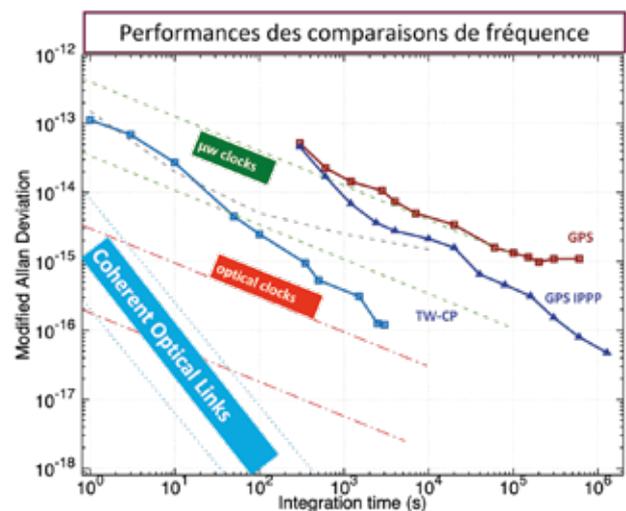
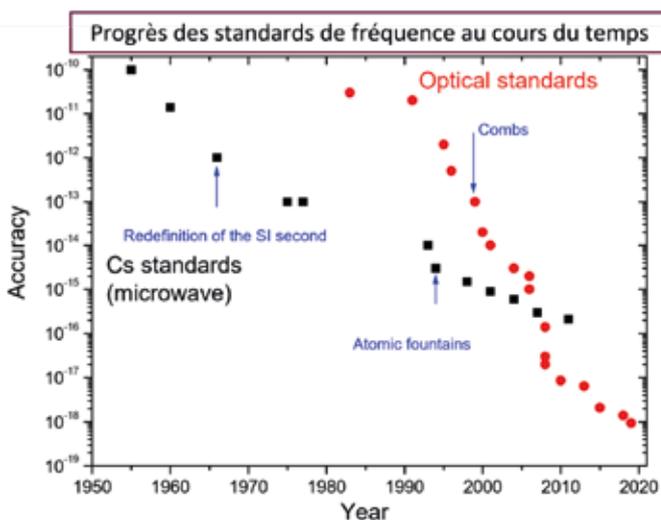
Les GNSS actuels sont basés sur la technologie des horloges atomiques inventée dans les années 1950, utilisant des signaux d'horloge dans la gamme des gigahertz. Cela détermine les erreurs de temps résiduelles (nanosecondes) qui peuvent être obtenues avec un récepteur GNSS par rapport au temps atomique international. La stabilité de fréquence du GNSS est également devenue largement insuffisante. Il faut dire que les horloges du GNSS n'ont pas bénéficié des 3 révolutions scientifiques majeures dont l'impact est illustré sur la Figure 1 (à gauche) : 1°/ l'utilisation du refroidissement des atomes par laser qui a remplacé les horloges à jet de césium par des fontaines atomiques, savoir-faire développé par le LTE (ex-SYRTE, ex-LPTF) dans les années 1990, 2°/ le développement de lasers femtosecondes à peignes

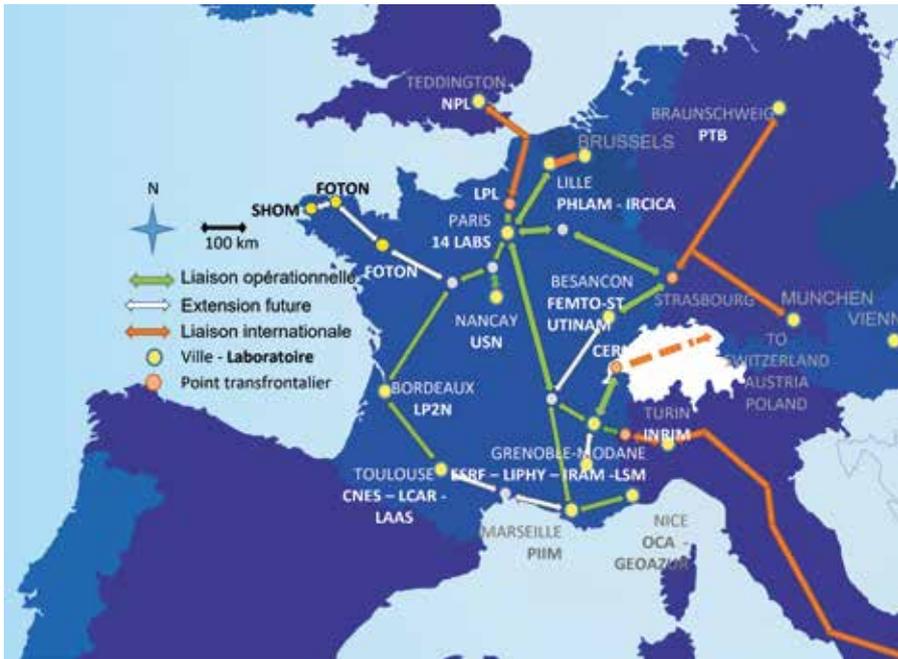
de fréquences qui ont remplacé des chaînes de fréquences d'une incroyable complexité et qui permettent de raccorder/comparer deux fréquences quelconques du spectre radiofréquence jusqu'à l'UV. 3°/ Cette seconde révolution a ouvert la voie à une troisième : le développement d'horloges dont la fréquence est dans le domaine optique. 6 ordres de grandeur ont ainsi été gagnés dans l'exactitude des horloges depuis 1967, année de la définition de la seconde basée sur une transition à 9,2 GHz du césium. Il n'existe pas de domaine de la mesure où de tels niveaux de précision sont atteints. C'est pourquoi sous l'impulsion du BIPM, une série d'unités physiques ont été raccordées à la seconde en fixant la valeur de quelques constantes fondamentales. La plus connue est la vitesse de la lumière fixée en 1983, ramenant ainsi la définition du mètre à celle de la seconde. La seconde est aujourd'hui la pierre angulaire du SI. Au vu des progrès

des horloges optiques, il devient tentant de définir la seconde par rapport à une (ou plusieurs) fréquence optique. Le BIPM a tracé une route exigeante pour y parvenir mais qui ne devrait pas déboucher avant une dizaine d'années.

Outre le choix de la (des) fréquence optique à sélectionner, le plus grand défi est de savoir comment assurer l'intercomparaison des horloges optiques des différents laboratoires de métrologie de la planète sans être limité par les performances des GNSS comme illustré sur la figure 1 (à droite). Le GPS, même en moyennant sur plusieurs jours est, de très loin, le facteur limitant dans la comparaison d'horloges optiques. Qui plus est, utiliser dans les satellites des horloges plus performantes ne servirait à rien car l'incertitude dominante résulte des fluctuations de phase des signaux dues à la traversée des basses couches de l'atmosphère. Sauf à rapprocher physiquement les horloges, le seul moyen de comparer au bon niveau des horloges optiques distantes est d'établir une liaison fibrée entre les deux laboratoires et d'injecter l'un des signaux d'horloge dans la fibre tout en corrigeant le bruit de phase rapporté lors de la propagation. Le signal transmis par la fibre est réinjecté à l'autre extrémité, effectuant ainsi un aller-retour. On réalise le battement entre ●●●

**Figure 1.** À gauche, les progrès de 6 ordres de grandeur des horloges atomiques depuis 1967. À droite, la révolution des liaisons par fibre optique avec un progrès de 5 ordres de grandeur par rapport au GPS pour les comparaisons des fréquences d'horloges.





**Figure 2.** Carte du réseau REFIMEVE connectant 30 laboratoires avec ses extensions européennes vers l'Allemagne, l'Italie et le Royaume-Uni. Environ 10 connexions supplémentaires devraient avoir lieu en 2025.

le signal injecté et le signal retour. Ceci donne l'erreur de phase accumulée. On applique une correction égale, au signe près, à la moitié de l'erreur de phase mesurée de façon à ce que le signal à l'extrémité de la fibre soit affranchi du bruit induit lors de l'aller simple. Cette méthode suppose l'absence de bruits non réciproques qui ne peuvent pas être corrigés. Pour vérifier la fréquence arrivant dans le laboratoire distant, elle est renvoyée vers le laboratoire initial *via* une seconde fibre stabilisée selon le même procédé. Elle est dès lors comparée avec celle du signal initial. La bande passante de l'asservissement est limitée par le temps aller-retour de la lumière dans la fibre. Pour une fibre de 100 km, elle est de l'ordre d'un kHz. Ces développements pionniers ont été effectués dès les années 2000 sur une liaison entre le Laboratoire de Physique des Lasers (LPL) et le SYRTE (Observatoire de Paris) qui a en charge le temps atomique français et qui fournit aujourd'hui les signaux du réseau REFIMEVE. La première comparaison de deux horloges optiques a eu lieu en 2015 entre les horloges à Strontium du SYRTE (Paris) et du

PTB (Braunschweig) [2]. Ces deux laboratoires étaient reliés par une liaison fibrée de 1400 km. La comparaison a révélé une différence de fréquence relative de  $2.10^{-15}$ , bien supérieure à l'incertitude cumulée des deux horloges évaluée à  $5.10^{-17}$ . Cet écart s'interprète par le décalage gravitationnel que prévoit la relativité générale pour une différence d'altitude des deux horloges de 20m. Cette différence d'altitude a été confirmée par des méthodes de géodésie reposant sur le... GPS. Ce résultat pionnier a eu un gros impact et a ouvert la voie à la géodésie chronométrique ayant une incertitude potentielle du cm. Dans cette comparaison, la contribution de la liaison fibrée au budget d'incertitude a été évaluée à  $10^{-19}$ , ce qui la rend tout à fait négligeable. Ce niveau de performance étonnant s'explique par le fait que la correction d'erreur repose sur un asservissement en phase. Si le bruit blanc de

phase résiduel se moyenne comme l'inverse de la racine carrée du temps de mesure, dans le domaine des fréquences, cela conduit à une moyenne variant comme l'inverse du temps de mesure. C'est ce que montre la figure 1 où l'on atteint la région des  $10^{-18}$  au bout de seulement 100 secondes.

### Le réseau REFIMEVE

REFIMEVE - Réseau Fibré Métrologique à Vocation Européenne - est un projet porté par le LPL et le SYRTE et né de la collaboration initiée en 2008 avec RENATER, le GIP bien connu du monde académique qui donne l'accès internet à une partie importante de l'enseignement supérieur et de la recherche. Cette collaboration [1] va jouer un rôle déterminant dans l'avance stratégique de REFIMEVE en tant que réseau temps-fréquence (T&F) dans le contexte européen et international.

En effet, l'accès à la fibre est un point bloquant pour ce type d'applications dans la plupart des cas. Or RENATER a permis la mutualisation de son réseau dédié au trafic de données. Par des méthodes de multiplexage-démultiplexage standard, le signal métrologique est introduit sur le réseau RENATER dans le canal 44 de la bande C. Ce canal 44 correspond à la longueur d'onde 1542 nm utilisée sur l'ensemble du réseau REFIMEVE que nous avons pu imposer dans nos collaborations à l'échelle européenne. Ce canal « noir » doit donc être libéré par les services de RENATER, ce qui est une contrainte assez mineure. Plus contraignant est le fait que REFIMEVE requiert un fonctionnement bidirectionnel comme expliqué ci-dessus alors que l'internet repose sur une paire de fibres optiques avec une fibre « montante » et une « descendante » et des amplificateurs monodirectionnels. Les obligations de service de RENATER impliquent de faire appel à des sous-traitants habilités lors de l'introduction des OADM

(Optical Add-Drop Multiplexer) sur le réseau pour la pose de nos équipements spécifiques.

**Un enjeu industriel**

Si la preuve du concept était une performance, l'appliquer à grande échelle soulève des difficultés d'une autre nature. Grâce à un financement du Programme d'Investissement d'Avenir en 2012, nous avons développé un partenariat avec une start-up MuQuans (aujourd'hui Exail) qui a développé une Station de Régénération Laser version industrielle à partir du prototype de laboratoire. Elle assure la stabilisation de la longueur optique du lien fibré et la distribution du signal corrigé vers le lien suivant ou vers un utilisateur. Une nouvelle version appelée MLS (Multi-branch Laser Station) permet aujourd'hui de distribuer le signal stabilisé dans cinq liens différents. Kheopsys (aujourd'hui Lumibird), quant à lui, a développé les amplificateurs bidirectionnels. Un point majeur aura été le développement d'un système de supervision distant qui assure le recueil de toutes les informations clés des instruments, le pilotage des asservissements. Ce système

est essentiel pour développer un réseau à l'échelle nationale avec un minimum de ressources humaines. Il est articulé avec la supervision du réseau RENATER qui, en cas d'urgence, peut interrompre les amplificateurs de REFIMEVE. Ce « droit de véto » n'a jamais été activé et voici 15 ans que coexistent sans encombre sur le même réseau physique le trafic de données et la distribution de temps-fréquence. Le transfert de savoir-faire a donné à ces entreprises une avance technologique qui leur permet aujourd'hui d'exporter dans de nombreux pays.

**REFIMEVE, premier réseau T&F d'envergure nationale**

En 2021, nous avons bénéficié d'un second financement du PIA sur 8 ans pour un projet T-REFIMEVE (ANR-21-ESRE-0029). La même année le réseau a acquis le statut d'infrastructure de recherche nationale. Outre une fréquence optique ultra-stable, nous nous sommes engagés à distribuer des signaux de temps et de radiofréquence. Dans une première phase, nous privilégions la technologie mature « White Rabbit » développée par le CERN il y a plus de 15 ans pour ses besoins

de synchronisation. Depuis, nous avons démontré que cette technologie peut être utilisée sur des liens de plusieurs centaines de km [3] et avons engagé une collaboration avec le CERN sur ce sujet. Quelques laboratoires bénéficient déjà de ce nouveau service. Tout le réseau en sera équipé en 2025. Il s'agit là d'une ouverture majeure car le champ d'applications s'en trouve considérablement élargi. Tous les domaines requérant la synchronisation de signaux localement comme les accélérateurs (synchrotrons, LHC, ...) ou distants comme les méthodes VLBI (Very Long Baseline Interferometry) en astrophysique peuvent être concernés. Des perspectives de développement de distribution de temps plus haute performance sont envisagées. La figure 2 représente l'ensemble du réseau REFIMEVE et l'encart résume les performances du réseau aujourd'hui et à horizon de 5 ans. Il distingue les performances des signaux T&F arrivant chez les utilisateurs – nécessairement limitées par celles des signaux injectés dans le réseau – des performances du réseau lui-même dans sa capacité à distribuer des signaux avec une dégradation minimale.

**LA FLEXIBILITÉ ET L'EXPERTISE AU SERVICE DE L'INNOVATION**

**LED UV**

**LED / MODULES LED VERSION STANDARD ET CUSTOM POUR PETITES À GRANDES SÉRIES**

- De 237 à 405 nm
- Large choix de puissances et d'angles
- Boîtiers CMS ou traversants

*Large gamme de Photodiodes UV également disponible*

**APPLICATIONS**

Décontamination - Stérilisation surfaces, fluides et air - Analyse de gaz - Spectroscopie - Curing - Fluorescence - Effets spéciaux - Forensic - Détection de contrefaçon...

Suivez nous ! [www.htds.fr](http://www.htds.fr)  
info@htds.fr

Ces signaux ont vocation à être distribués en continu. En pratique, l'injection dans le réseau par le SYRTE est effective à 99% du temps. Le fonctionnement des liens eux-mêmes est de l'ordre de 80 à 90% du temps. Nombre d'interruptions ont lieu pour des raisons de service indépendante de REFIMEVE (intervention sur le réseau RENATER, déménagement de data centres). Un gros effort est mené pour que les utilisateurs disposent en temps réel des informations sur l'état du réseau, de ses performances, ... La gestion de ces données est un enjeu majeur pour la qualité de service et nous nous projetons dans des applications du réseau qui requièrent une continuité sans faille sur plusieurs semaines comme pour certaines campagnes d'acquisition de données astrophysiques.

### Des applications potentielles fascinantes

L'exploitation des signaux de REFIMEVE est essentiellement à l'initiative des utilisateurs. Par exemple, l'expérience ALPHA du CERN (mesure de la gravité sur de l'antimatière dont des résultats pionniers ont été publiés en 2023) teste la référence de fréquence optique de REFIMEVE dans la perspective de s'affranchir d'une fontaine atomique nécessaire aujourd'hui pour la calibration de cette expérience. De très nombreuses utilisations en physique fondamentale, en spectroscopie, sont déjà à l'œuvre. Nous n'avons surement pas imaginé tout le potentiel que peut apporter cette infrastructure en développement. Nous voulons néanmoins mettre l'accent sur deux domaines emblématiques, les applications au « fiber sensing » et aux communications quantiques et à la distribution de clés quantiques.

### Le réseau REFIMEVE utilisé comme capteur

Les fibres optiques sont très sensibles à leur environnement. C'est

grâce à des méthodes d'asservissement très efficaces corrigeant ces bruits que les signaux de fréquence optique sont transmis sans dégradation. Si, au contraire, nous cherchons à analyser ces « bruits », ils peuvent révéler des signaux très riches. Il se trouve que dans le processus de stabilisation d'un lien optique, nous enregistrons systématiquement le signal d'erreur avant toute correction. Ceci est illustré (Fig. 3) sur la liaison Observatoire de Paris - Villetaneuse (43 km) où l'on a extrait une séquence coïncidant avec un tremblement de terre qui s'est produit au Mexique en septembre 2022. Le signal obtenu est comparé avec celui d'un sismomètre de l'IPGP (Institut de Physique du Globe de Paris) et une corrélation de 94% des signaux a été obtenue. L'utilisation de fibres optiques pour détecter tout type d'effets sismiques

ou de température n'a rien de nouveau. C'est un champ de développement extrêmement actif présentant un haut niveau de maturité industrielle. Appelée « Distributed Acoustic Sensing » - DAS, l'une des méthodes de détection les plus connues, Optical Time Domain Reflectometry (OTDR) repose sur la rétrodiffusion Rayleigh. Grâce à un codage temporel variable de la source laser injectée dans la fibre optique, on peut obtenir de l'information distribuée le long de la fibre optique. La longueur utile de la fibre est limitée en pratique à 50-100 km par la longueur de cohérence de la source laser des systèmes DAS industriels. Cette contrainte disparaît si on dispose d'une source comme celle de REFIMEVE dont la longueur de cohérence est largement supérieure à 10000 km. Disposer d'une source de qualité métrologique

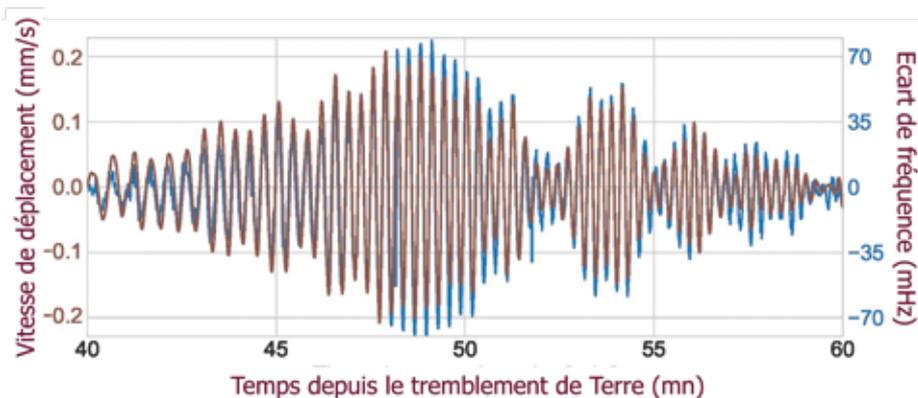
### SYNTHÈSE DES PERFORMANCES DES SIGNAUX DE REFIMEVE AUJOURD'HUI ET À HORIZON DE CINQ ANS

Signal distribué par REFIMEVE		Stabilité absolue ou relative @1s	Stabilité absolue ou relative @1 jour	Incertitude	
				en routine	ultime
Radiofréquence	1 <sup>ère</sup> phase - 10 MHz (White Rabbit)*	1,00E-12	1,00E-15	1,00E-14	1,00E-15
	2 <sup>ème</sup> phase - 1 GHz	1,00E-13	3,00E-16	1,00E-14	2,00E-16
Temps	1 <sup>ère</sup> phase (White Rabbit)*	1 ns	1 ns	10 ns	10 ns
	2 <sup>ème</sup> phase	20-50 ps	500 ps	10 ns	2ns to 100ps†
Fréquence optique (@1542 nm)	Aujourd'hui	1,00E-15	3,00E-16	1,00E-14	2,00E-17
	A horizon 5 ans	1,00E-16	2,00E-17	1,00E-14	1,00E-18

Les signaux injectés dans le réseau REFIMEVE sont tracés par rapport à l'UTC(OP), temps atomique français élaboré à l'Observatoire de Paris. Les performances ci-dessus sont susceptibles d'évoluer avec celles des signaux injectés.

Performance du lien optique*		Stabilité absolue ou relative @1s	Stabilité absolue ou relative @1 jour	Incertitude
Radiofréquence	1 <sup>ère</sup> phase - 10 MHz (White Rabbit)*	1,00E-12	1,00E-15	1,00E-15
	2 <sup>ème</sup> phase - 1 GHz	1,00E-13	1,00E-17	1,00E-17
Temps	1 <sup>ère</sup> phase (White Rabbit)*	1-5 ps	10-100 ps	10 ns
	2 <sup>ème</sup> phase	1 fs	100 fs	100 ps
Fréquence optique (@1542 nm)	Aujourd'hui	1,00E-15	1,00E-19	1,00E-19
	A horizon 5 ans	1,00E-16	1,00E-20	1,00E-20

\* ces performances peuvent dépendre du lieu du laboratoire utilisateur



**Figure 3.** Signal d'erreur enregistré sur la fibre optique SYRTE-LPL en septembre 2022 pendant 20 mn, environ 40 mn après le tremblement de Terre à Mexico. Ce signal présente une corrélation à 94% avec celui d'un sismomètre de l'IPGP [4].

permettra d'appliquer le DAS sur des longueurs de plusieurs centaines de km, ce qui élargit très sensiblement les perspectives applicatives. Les sujets concernés sont l'étude de tous effets sismiques d'origine naturelle mais aussi la surveillance des bâtiments, des routes et voies de chemin de fer. L'autre grand domaine est les effets thermiques qui présentent des temps caractéristiques beaucoup plus longs, ce qui permet de les distinguer des effets sismiques. L'enjeu principal est le suivi des variations de température du fond des océans et le long des côtes à l'aide de fibres sous-marines. L'avantage est l'obtention d'information en continu, distribuée et requérant très peu de logistique. Ces perspectives relèvent encore de la R&D mais sont au cœur du projet européen SENSEI – Smart European Networks for Sensing the Environment and Internet quality – où nous portons l'essentiel des développements photoniques du projet en collaboration avec les industriels du domaine.

### Le temps-fréquence et les communications quantiques

Le domaine des technologies quantiques a connu un développement extrêmement intense au cours des 10 dernières années, avec un soutien financier étatique très puissant à travers le monde. L'initiative EuroQCI en est un exemple emblématique, avec de fortes collaborations entre programmes au niveau national. En effet, de nombreuses applications du secteur majeur de la

communication quantique et de la distribution de clés quantiques (QKD) nécessitent un timing ultra-précis pour synchroniser l'heure d'arrivée des paires de signaux quantiques, et une stabilisation de la liaison par fibre optique pour éviter la décohérence due au bruit de liaison. Le timing ultra-précis délivré par REFIMEVE pourrait conduire à des réseaux quantiques plus performants. Inversement, la technologie quantique pourrait aider à protéger les infrastructures T&F telles que REFIMEVE contre les risques de cybersécurité.

La symbiose des communautés T&F et de la communication quantique a déjà pris forme dans plusieurs pays européens. Parmi les exemples, citons le projet QTF-backbone en Allemagne qui vise à construire un réseau dédié à double paire de fibres noires à l'échelle nationale,

l'initiative similaire IQT dans le domaine de l'informatique et les recherches menées dans le cadre du programme QDNL aux Pays-Bas. Une synergie accrue entre ces deux communautés faciliterait la R&D conjointe, en utilisant éventuellement une partie dédiée du réseau REFIMEVE (en particulier là où des fibres noires sont disponibles) où en connectant directement les bancs d'essai de la QKD au réseau REFIMEVE.

### Conclusion

Le réseau REFIMEVE encore en phase de développement pourrait rapidement devenir un outil indispensable pour de nombreux domaines scientifiques mais aussi pour des acteurs industriels tels que les télécoms, le monde de la défense, plus largement les secteurs de R&D ayant besoin de références de temps ou fréquence ultrastables. Ces développements pourraient franchir une nouvelle étape si le projet d'infrastructure européenne appelé FOREST – Fiber-based Optical network for European Science and Technology – est retenu sur la feuille de route ESFRI en 2026. Ce projet s'appuie sur les instituts nationaux de métrologie, les « National Research and Education Networks » (NREN) comme RENATER et GEANT organisation européenne qui assure les connexions transfrontalières entre les réseaux nationaux. L'Europe disposerait ainsi d'une infrastructure sans équivalent au monde et dont l'impact dépasserait très largement la seule sphère académique. ●

### RÉFÉRENCES

- [1] O. Lopez *et al*, *Opt. Express* **18**, 16849 (2010).
- [2] C. Lisdar *et al*, *Nature Commun* **7**, 12443 (2016)
- [3] N. Namneet Kaur. Thèse, Observatoire de Paris, 2018. tel-01913286
- [4] M. Tønnes. These Université Paris sciences et lettres, 2022. tel-04218313

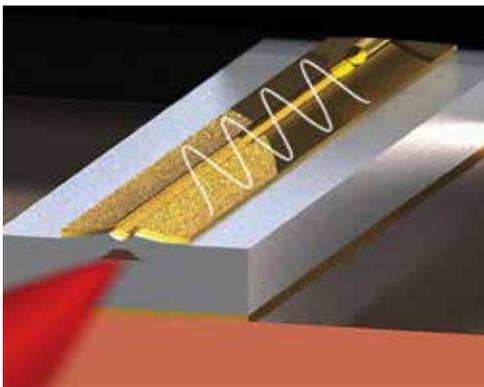
# LE LASER À CASCADE QUANTIQUE A TRENTE ANS ET TOUTE LA VIE DEVANT SOI



**Carlo SIRTORI\***

Laboratoire de Physique de l'Ecole Normale Supérieure, ENS, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Université Paris Cité, Paris 75005, France

\*carlo.sirtori@ens.fr



**Il y a 30 ans je faisais partie de l'équipe des Laboratoires Bell qui a conçu et démontré le laser à cascade quantique, une puissante source de lumière infrarouge, réalisée par une complexe ingénierie qui combine plusieurs phénomènes quantiques, tels que l'effet tunnel et la discrétisation des niveaux d'énergie. Dans cet article, je raconte l'aventure de sa découverte, les conditions qui l'ont permise, le plaisir et la fierté d'être un jeune chercheur.**

<https://doi.org/10.1051/photon/202513030>

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

**L**a première démonstration du laser à cascade reste pour moi l'un des moments les plus magiques de ma vie de chercheur. Il est difficile d'expliquer l'immense bonheur provoqué par l'aiguille qui d'un coup va au fond de la course, le voyant rouge s'allume et indique « saturé ». C'est l'aiguille de l'instrument qui mesure la puissance optique émise par la microscopique puce du premier laser à cascade quantique. Quelques instants plus tard, pour une drôle de raison, le bonheur se mélange à

la peur d'avoir juste forcé l'imagination et que la réalité, impitoyable, va révéler que tout est faux. Ces deux sensations antagonistes restent longtemps mélangées. Pendant des jours, on sent le besoin de partager la découverte, on invite les collègues au laboratoire et on reçoit les visites de la hiérarchie. Ce désir de partage est lié à la nécessité d'être rassurés sur la validité de l'expérience, mais sans doute aussi au plaisir de raconter, avec une fierté non dissimulée (que l'on aperçoit dans les photos de la Fig. 1), l'exploit scientifique dont nous sommes les auteurs.

Cette aventure démarre à la fin de mon doctorat en 1990, quand j'ai rejoint les Bell Laboratories en tant que post-doctorant dans le groupe de Federico Capasso. À cette époque, Bell Labs était une des références mondiales dans le domaine de la physique de la matière condensée et des dispositifs à semi-conducteurs. Un laboratoire exceptionnel pour le caractère fondamental et la richesse de ses recherches, tout en étant le centre d'innovation technologique d'une entreprise privée, AT&T. Y travailler signifiait être entouré des meilleurs chercheurs mondiaux dans différents

domaines, ce qui nous permettait d'apprendre la physique quantique et ses implications technologiques d'une façon *osmotique*, par le contact quotidien avec les autres scientifiques. L'environnement exceptionnel de Bell Labs était stimulant et en même temps très exigeant vis-à-vis des jeunes chercheurs : une situation idéale pour lancer leurs carrières, les motiver et les former.

À mon arrivée, j'ai initié l'activité de recherche sur les dispositifs optoélectroniques unipolaires à base de puits quantiques, des fines couches de semi-conducteur, de quelques nanomètres, prises en sandwich entre deux autres semi-conducteurs à plus large bande interdite. Ces structures créent un potentiel artificiel pour les électrons qui restent confinés dans des régions de dimension comparables à leur longueur d'onde, ce qui engendre la formation des niveaux discrets d'énergie.

La première étape vers le laser à cascade quantique a été l'étude des propriétés linéaires et non-linéaires des transitions optiques entre les niveaux électroniques dans la bande de conduction. Ces transitions sont très différentes de celles entre les bandes de conduction et de valence, qui ont lieu dans les diodes électroluminescentes ou les lasers à semi-conducteurs. En effet, les énergies de transition entre niveaux de la bande de conduction ne dépendent pas de la

bande interdite et varient donc de pratiquement zéro à une énergie comparable à celle de la profondeur du puits quantique. Ainsi, le domaine spectral de ces transitions optiques s'étend de la région des THz ( $\lambda \sim 300 \mu\text{m}$ ), jusqu'à l'infrarouge moyen ( $\lambda \sim 3 \mu\text{m}$ ).

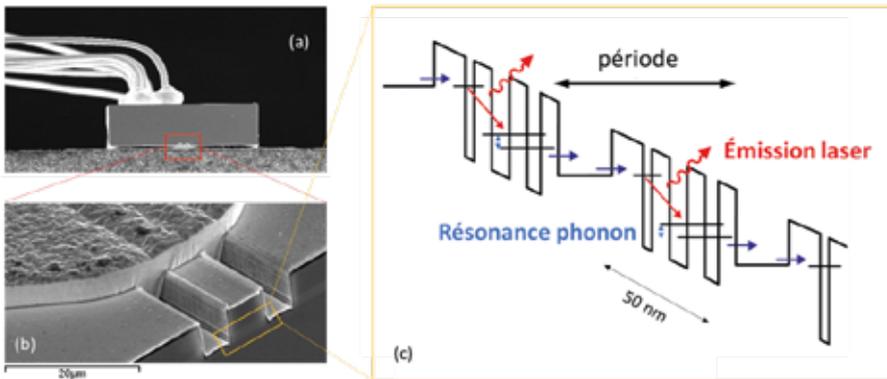
À la fin de cette étude, nous avons compris que les fonctions d'onde des électrons restent cohérentes et peuvent se délocaliser dans plusieurs puits couplés par des fines barrières tunnel. Nous avons pris conscience, grâce à la technologie des puits quantiques, qu'il était possible de réaliser des potentiels très complexes où nous pouvions maîtriser la séparation énergétique entre les états et le recouvrement des fonctions d'onde. Ces potentiels complexes, formés de séries de puits quantiques couplés par l'effet tunnel, deviendront, deux ans après, la base des régions actives des lasers à cascade quantique.

Le grand tournant du projet a coïncidé avec l'arrivée de Jérôme Faist dans le groupe de Federico Capasso, qui avait déjà, pendant sa thèse, travaillé sur les lasers à semiconducteur. Il apportait des connaissances puissantes en optoélectronique et une intuition inégalée sur les dispositifs

quantiques, deux caractéristiques qui font de lui, aujourd'hui, un grand scientifique reconnu mondialement. Avec sa détermination, il a su rapidement comprendre les résultats de mes recherches et des modèles que j'avais développés pour décrire les structures quantiques et leur interaction avec la lumière. L'exorde de la recherche sur la réalisation d'un laser unipolaire n'a pas été simple et a donné quelques résultats inquiétants. En particulier, l'étude expérimentale du temps de vie de l'état excité du laser donnait des valeurs de l'ordre de la picoseconde, en excellent accord avec la théorie de l'interaction phonon-électron, développée par Gerald Bastard et Robson Ferreira [1]. Le défi était là : générer de l'inversion de population entre deux niveaux électroniques dont l'état excité a un temps de vie d'une picoseconde ou moins. Après un moment de découragement, car nous avons réalisé que c'était impossible d'allonger le temps de vie de l'état excité, nous sommes repartis à l'attaque en cherchant une solution pour raccourcir le plus possible le temps de vie de l'état de basse énergie de la transition laser. La solution de notre problème fut d'imposer une résonance ●●●

**Figure 1.** À gauche : Les auteurs de l'article relatant l'invention du laser à cascade quantique, avec la couverture de Science. De gauche à droite : Federico Capasso, Alfred Cho, Albert Hutchinson, Deborah Sivco, Jérôme Faist, Carlo Sirtori. À droite : Photo prise par F. Capasso de J. Faist et C. Sirtori dans le laboratoire après la première démonstration du laser à cascade quantique.





**Figure 2.** (a) Puce d'un laser à cascade quantique monté « tête en bas ». (b) Ruban laser en double tranchée, partiellement couvert d'une couche d'or électrolytique pour améliorer la dissipation thermique. (c) Schéma simplifié du potentiel électronique utilisé dans la région active d'un laser à cascade quantique, avec les niveaux électroniques principaux.

entre ce niveau et les phonons optiques (voir fig. 2c). Cette résonance nous a permis de réduire le temps de vie de l'état inférieur suffisamment pour obtenir l'inversion de population et donc le gain optique. La dernière étape fut la compréhension et le dessin du potentiel pour injecter les électrons par effet tunnel dans le niveau excité de la transition laser. Après ce dernier effort, tout s'est accéléré. Nous avons tout de suite observé l'électroluminescence et, quelques semaines plus tard, le premier laser que nous avons fabriqué a atteint le seuil : nous avons ainsi mesuré pour la première fois la lumière émise d'un laser à cascade quantique [2]. C'était le 14 janvier 1994, un vendredi soir.

La figure 2 montre une puce de laser à cascade quantique sur trois échelles de taille différentes. A la plus petite échelle (Fig. 2c), on voit le schéma typique du potentiel électronique, constitué de puits quantiques de semiconducteur couplés par effet tunnel et soumis à un potentiel électronique. Les électrons sont injectés dans la région active du laser, où le gain optique est obtenu grâce à la résonance phonon entre l'état fondamental de la transition laser et le niveau d'extraction. Le processus de « cascade » consiste à recycler les électrons extraits en les réinjectant dans la période suivante. La figure 2b montre

le ruban, constituant le guide d'onde et contenant la région active. Le laser est ensuite monté « tête en bas » sur une embase (Fig. 2a), pour aider la dissipation thermique du composant et permettre ainsi un fonctionnement à température ambiante.

Après la première démonstration du laser à cascade quantique, pendant quatre ans nous nous sommes focalisés à mieux comprendre la physique qui régit son fonctionnement et à améliorer ses performances. Nous étions pratiquement sans compétiteurs, car la complexité du dessin quantique pour obtenir du gain optique rendait difficile la reproduction rapide nos résultats.

Au-delà des exploits scientifiques, un aspect inoubliable de ces années restera toujours pour moi l'excellente relation que Federico, Jérôme et moi avons développée. Il s'agissait d'une véritable synergie basée sur la confiance et le respect réciproque. Bien sûr, Jérôme et moi étions sous le leadership de Federico. Néanmoins, par le partage continu de ses visions illuminées et par son enthousiasme scientifique, il était toujours proche de nos efforts de jeunes chercheurs, au point que nous travaillions avec lui comme de paires : il était notre collègue privilégié plutôt que notre chef directeur. Nous étions une équipe de seulement trois chercheurs, et

travaillions en collaboration étroite avec le groupe de Al Cho qui faisait la croissance des cristaux semiconducteurs à puits quantiques. Une équipe minuscule par rapport aux standards actuels. Toutefois, la structure de Bell Labs était d'une efficacité redoutable et nous permettait d'avoir un rendement bien au-delà des limites thermodynamiques. Nous avions à notre disposition les ateliers de mécanique et d'électronique, une salle blanche pour la fabrication et une « stock-room » où nous pouvions emprunter toute sorte d'outillage et de composants électroniques. Les bouteilles d'hélium liquide étaient dans le sous-sol et il fallait faire juste une promenade de quelques minutes pour aller les chercher, sans devoir les payer ! Federico était chef de département et, pendant certaines périodes, il était occupé par le management ; Jérôme et moi, par contre, pouvions nous concentrer sur la recherche sans pratiquement aucune tâche administrative. Une véritable immersion dans la science.

À la fin de ces quelques années complètement dédiées à « l'enfance » du laser à cascade quantique, en 1997, j'avais décidé de quitter le groupe de Capasso à Bell Laboratories pour poursuivre mes activités scientifiques en Europe. Jérôme Faist, d'une façon complètement indépendante, avait décidé de même. L'aventure continuait donc de l'autre côté de l'Atlantique.

J'avais accepté une offre du Laboratoire Central de Recherche de Thomson-CSF, aujourd'hui THALES, afin de travailler sur le développement de lasers à cascade quantique dans des systèmes de matériaux différents de ceux que j'avais utilisés aux États-Unis. Il s'agissait d'un projet ambitieux, visant à démontrer la validité générale des concepts régissant le fonctionnement des lasers à cascade quantique. En effet, le gain optique de ce laser unipolaire peut être conçu indépendamment du système de matériaux semiconducteurs, à condition que celui-ci permette la croissance de puits quantiques à l'état de l'art. Le

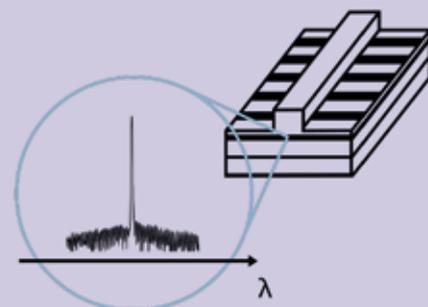
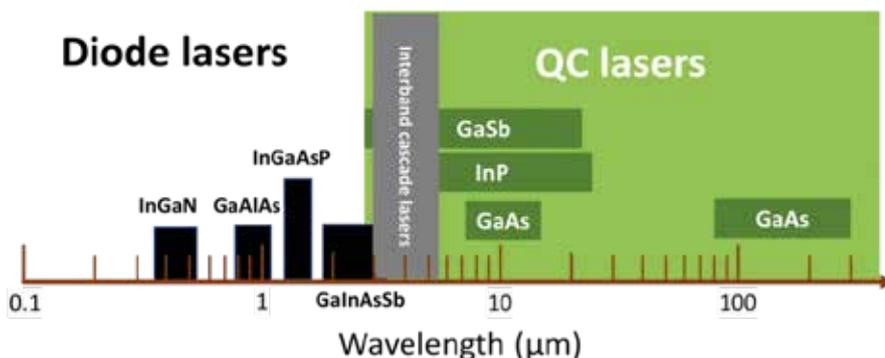
premier système de matériaux que j'ai choisi comme nouveau support pour les concepts des lasers à cascade quantique a été le GaAs/AlGaAs sur substrat de GaAs, qui est, après le silicium, le semiconducteur le plus utilisé en technologie. Mon arrivée à Thomson a été aussi l'occasion pour lancer à niveau européen la technologie de ces lasers. J'ai donc monté et ensuite coordonné un projet européen, comprenant cinq pays, qui visait un véritable transfert technologique des dispositifs déjà démontrés aux USA et le développement de lasers dans de nouveaux systèmes de matériaux. Ce projet a été le premier d'une série de succès qui ont permis d'implanter en Europe le savoir-faire et l'industrialisation des lasers à cascade quantique. Ce n'est pas un hasard que la première compagnie produisant ces sources de lumière, Alpes Lasers, fut fondée en Suisse par Jérôme Faist.

Le projet visant à transférer les lasers à cascade quantique vers de nouveaux systèmes de matériaux a rapidement porté ses fruits. Un an après mon arrivée chez Thomson (THALES), j'ai démontré le premier laser à cascade quantique en GaAs/AlGaAs [3]. En 2003, en collaboration avec l'Université de Montpellier, j'ai également contribué à la réalisation de lasers dans des semi-conducteurs à base d'antimoine (InAs/AlSb sur substrat GaSb) [4]. Dans ces deux projets, j'ai eu la chance de bénéficier du soutien scientifique de chercheurs exceptionnels, comme Julien Nagle chez Thomson, ainsi qu'Alex Baranov et Roland

Teissier à l'Université de Montpellier. Leur expertise dans le domaine des dispositifs semi-conducteurs a été essentielle à la réussite de ces travaux, qui auraient été bien plus complexes sans leurs contributions. Le GaAs est, aujourd'hui, le matériau d'excellence pour la réalisation des lasers à cascade quantique dans le domaine de fréquences THz, *i.e.* aux longueurs d'onde de l'ordre de 100  $\mu\text{m}$  ou plus (voir Fig. 3). D'autre part, les dispositifs fabriqués dans le système des antimoniures sont aujourd'hui parmi les meilleurs lasers entre 10 et 20  $\mu\text{m}$  ; ils sont produits en France par la société MirSense. De plus, les recherches continuées à l'Université de Montpellier ont démontré que les lasers à cascade quantique dans ce système de matériaux peuvent se faire sur des substrats de silicium [5], ouvrant la voie vers l'intégration de ces sources de lumière avec la technologie C-MOS.

Les premières années après la démonstration de lasers à cascade quantique ont été dédiées surtout à l'amélioration de ses performances, nous étions pressés de saisir son potentiel en tant que futur produit commercial. Néanmoins, en 2003, quand j'avais déjà un poste de professeur à l'Université Paris-Diderot, une jeune théoricienne, Angela Vasanelli, avait rejoint mon groupe en tant que Maître de conférences. C'était une excellente occasion pour changer le cap et démarrer une activité de recherche fondamentale sur la physique du laser. Nous nous sommes, donc, focalisés sur les phonons, ●●●

**Figure 2.** Plage de fonctionnement des lasers à cascade quantique comparée à celle des diodes lasers. La longueur d'onde d'émission des diodes lasers est fixée par l'énergie de bande interdite du semiconducteur, tandis que celle des lasers à cascade quantique est contrôlée par l'ingénierie quantique.



- ▲ DFB de 760nm à 2900nm
- ▲ Et ICL de 2800 à 6500nm

MAIS AUSSI,  
LASERS À CASCADE QUANTIQUE

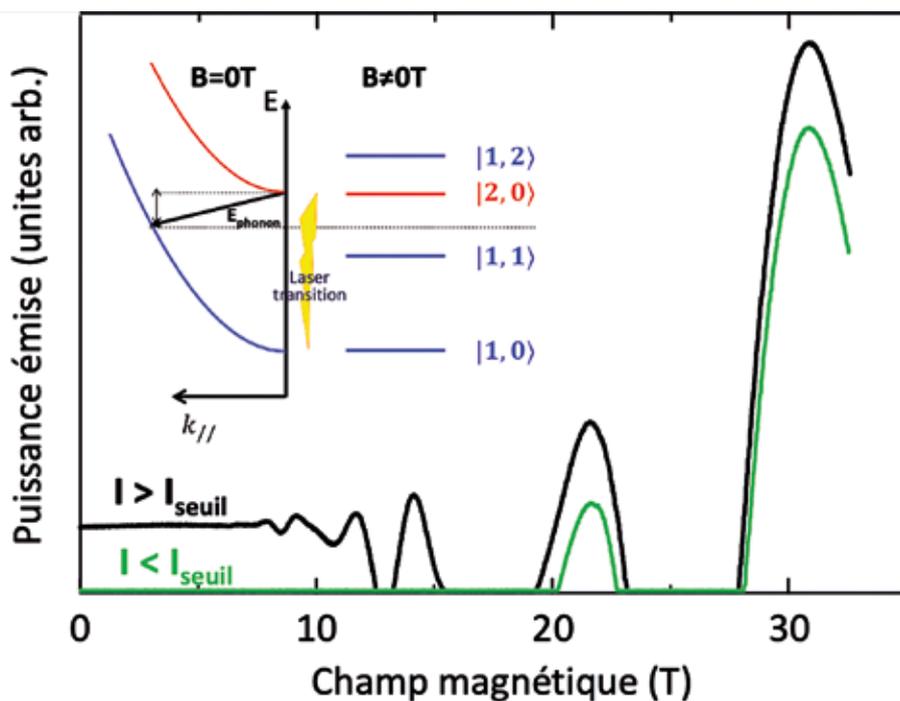


- ▲ QCL cw et pulsés
- ▲ 6 $\mu\text{m}$  à 14 $\mu\text{m}$
- ▲ 20mW (DFB CW)
- ▲ 100mW typ crête (DFB pulsé et FP)
- ▲ Boîtier HHL avec collimation



LASERS ICL DE PUISSANCE  
BOÎTIER BUTTERFLY





**Figure 4.** Puissance optique émise par un laser à cascade quantique en fonction du champ magnétique appliqué. Les deux courbes ont été obtenues à courant fixé, en dessous (courbe verte) ou au-dessus (courbe noire) du seuil d'émission laser à champ magnétique nul. L'encart présente un schéma des niveaux d'énergie, montrant la formation des niveaux de Landau en présence d'un champ magnétique.

pour comprendre s'ils étaient vraiment l'ennemi « numéro 1 » de l'inversion de population. Plus précisément nous avons étudié l'interaction électrons-phonons, le phénomène qui rend si court les temps de vie des niveaux excités. L'étude consistait à immerger les lasers dans des champs magnétiques intenses pour briser les bandes des états électroniques en niveaux discrets d'énergie, les niveaux de Landau (encart de fig. 4). Pour ces expériences nous avons eu le plaisir de collaborer avec Jean Leotin et Dmitry Smirnov du Laboratoire de Champs Magnétiques Intenses, qui nous a permis d'accéder à des champs d'une cinquantaine de Tesla ! Les résultats obtenus étaient très clairs : pour tout champ magnétique qui bloquait l'interaction électrons-phonons, le gain du laser augmentait significativement, son seuil diminuait et la puissance optique augmentait d'un ordre de grandeur. Ces résultats sont montrés dans la Fig. 4, où

la puissance optique est tracée en fonction du champ magnétique. À fort champ, la séparation entre les niveaux de Landau est très différente de l'énergie des phonons optiques, ce qui donne lieu à un goulot d'étranglement pour leur émission. La théorie d'Angela reproduisait exactement les résultats expérimentaux [6],

nous n'avions plus aucun doute : les phonons étaient (et sont encore) les responsables du seuil important des lasers à cascade quantique. C'était le premier d'une longue série de travaux qu'Angela et moi menons ensemble. La théorie développée nous a permis, au cours des années, de dessiner et de réaliser plusieurs générations de dispositifs quantiques et d'établir une collaboration très fructueuse avec l'équipe d'Isabelle Sagnes au C2N. Trente ans après leur découverte, les lasers à cascade quantique continuent d'améliorer leurs performances et de stimuler de nouvelles recherches. Actuellement, ils sont produits par une vingtaine d'entreprises réparties entre l'Europe, l'Asie et les États-Unis. Bien que le principal marché soit encore celui des laboratoires de recherche, les applications liées à la transition écologique, en particulier la détection ultrasensible de molécules, prennent une importance croissante. Ces lasers présentent également un fort potentiel commercial dans des domaines tels que les communications en espace libre et l'imagerie médicale. Par ailleurs, leurs applications dans le domaine militaire, notamment pour les contremesures optiques, sont bien établies. Plus que jamais, ces lasers suscitent un intérêt commercial grandissant, et nous sommes sur le point de les voir intégrer des marchés de masse. ●

## RÉFÉRENCES

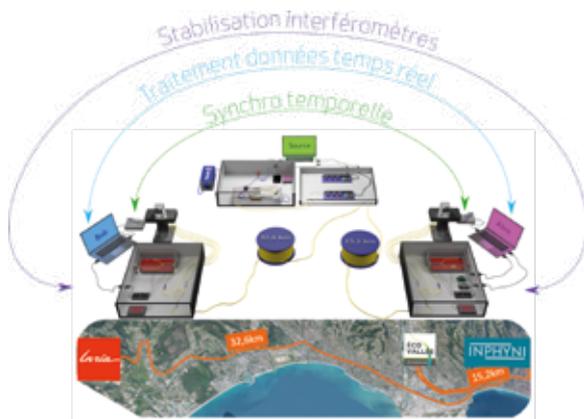
- [1] R. Ferreira and G. Bastard, *Phys. Rev. B* **40**, 1074 (1989)
- [2] J. Faist, F. Capasso, D.L. Sivco, C. Sirtori, A.L. Hutchinson, A.Y. Cho, *Science* **264**, 553 (1994)
- [3] C. Sirtori, P. Kruck, S. Barbieri, P. Collot, J. Nagle, M. Beck, J. Faist, U. Oesterle, *Appl. Phys. Lett.* **73**, 3486 (1998)
- [4] R. Teïssier, D. Barate, A. Vicet, D.A. Yarekha, C. Alibert, A.N. Baranov, X. Marcadet, M. Garcia, and C. Sirtori, *Electronics Lett.* **19**, 17 (2003)
- [5] Hoang Nguyen-Van, Alexei N. Baranov, Zeineb Loghmani, Laurent Cerutti, Jean-Baptiste Rodriguez, Julie Tournet, Gregoire Narcy, Guilhem Boissier, Gilles Patriarche, Michael Bahriz, Eric Tournié & Roland Teïssier, *Sci Rep* **8**, 7206 (2018)
- [6] A. Leuliet, A. Vasanelli, A. Wade, G. Fedorov, D. Smirnov, G. Bastard and C. Sirtori, *Phys. Rev. B* **73**, 085311 (2006)

# DISTRIBUTION QUANTIQUE DE CLEF SUR RÉSEAU DÉPLOYÉ : ENJEUX ET DÉFIS

Olivier ALIBART\*, Virginia D'AURIA, Jean ETESSSE, Laurent LABONTÉ, Anthony MARTIN, Yoann PELET, Tess TROISI, Éric PICHOLLE, Grégory SAUDER, Sébastien TANZILLI

Université Côte d'Azur, CNRS, Institut de Physique de Nice, Nice, France

\*[olivier.alibart@univ-cotedazur.fr](mailto:olivier.alibart@univ-cotedazur.fr)



Les technologies quantiques s'aventurent aujourd'hui en dehors des laboratoires. Une équipe chinoise a même déjà distribué des clefs sur plusieurs milliers de km via un satellite. De telles annonces sensationnelles masquent cependant la partie immergée de l'iceberg : la seconde révolution quantique est constituée d'une multitude d'avancées scientifiques et technologiques très diverses, que nous souhaitons illustrer ici par la démonstration réalisée par l'équipe azurienne : distribution quantique de clef sur 50 km basée sur l'intrication.

<https://doi.org/10.1051/photon/202513035>

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.

## CONTEXTE

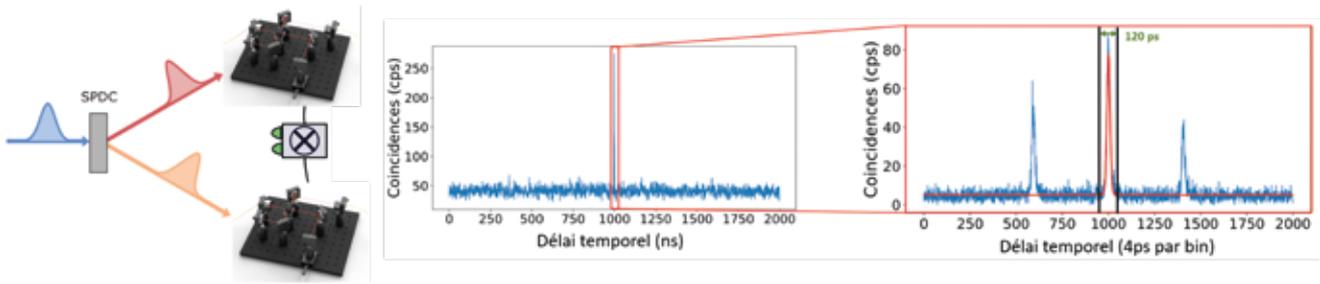
Il aura fallu un peu moins d'un siècle pour passer de la "physique quantique" des pionniers aux "technologies quantiques". Ce changement de terminologie est lourd de sens. La première révolution quantique visait à comprendre le monde, et le rôle de l'observateur. Avec la seconde, l'heure est à la manipulation active des ressources pour concevoir des états quantiques spécifiques et développer de nouveaux dispositifs.

C'est dans ce cadre que se situe la preuve de principe de QKD sur 50 km

réalisée par l'Institut de physique de Nice en collaboration avec Orange [1]. Si la distribution de l'intrication est désormais monnaie courante dans les salles d'expérimentation des laboratoires, il s'agit bel et bien ici de la distribuer entre deux sites distants de 50 km, *via* le réseau de fibres optiques d'un opérateur commercial, et de transformer ces corrélations quantiques en deux séries aléatoires de bits (0 et 1) parfaitement corrélées entre elles pour permettre à deux acteurs (Alice et Bob) de réaliser des échanges de données sécurisés par

les lois de la physique quantique.

Nous renvoyons le lecteur aux articles de Sara Ducci et Nicolas Sangouard pour le détail de l'utilisation de l'intrication comme ressource pour la distribution quantique de clefs ; dans cet article, nous tâchons de nous concentrer sur les enjeux et les défis à surmonter pour sortir du laboratoire et offrir un système opérationnel d'établissement de clefs secrètes à distance. Par ailleurs, de petits encarts évoqueront succinctement les enjeux et les défis liés au déploiement selon le ●●●



point de vue des autres composantes des technologies quantiques, comme la métrologie, les mémoires et les futurs protocoles de communication quantique émergents mais aussi les questions humaines et sociales que le domaine peut susciter.

### ENJEUX ET DÉFIS EN DEHORS DU LABORATOIRE

Une expérience d'optique quantique, c'est d'abord une bonne dose d'optique non-linéaire pour la génération de paires de photons intriqués et beaucoup d'interférométrie pour les manipuler, et analyser correctement les observables choisies (polarisation, énergie, temps d'émission, mode spatial...). Nos laboratoires sont autant de bulles privilégiées, à l'abri desquelles de nouveaux protocoles dont sont issus la distribution quantique de clés, la téléportation quantique d'état, etc., ont pu émerger depuis une trentaine d'années. Toutefois, ces protocoles n'ont pas vocation à y rester confinés. Les chercheurs et les chercheuses ont également pour mission d'assurer le transfert technologique vers le monde réel. Pour cela, les dispositifs quantiques doivent aussi devenir compacts, résistants aux perturbations extérieures (vibration, humidité, température...), énergétiquement sobres, résilients, c'est-à-dire capables d'autodiagnostiquer les défaillances et de redémarrer seuls. Sacré cahier des charges ! S'y ajoutent d'autres contraintes fortes comme la gestion des flux d'information enregistrés et traités quasiment en temps réel ou les besoins de synchronisation et de stabilisation entre les dispositifs de mesure.

**Figure 1.** Principe d'une expérience de mesure de corrélations énergie-temps portées par des paires de photons intriqués. La réalisation sur table optique offre une souplesse permettant d'exploiter au mieux les composants d'optique traditionnelle et de mesurer les corrélations temporelles à l'aide d'un unique dispositif de datation. Les données recueillies donnent un histogramme des coïncidences duquel l'utilisateur reconstruit les statistiques permettant d'observer des corrélations quantiques. L'utilisation d'une paire d'interféromètres dit de "Franson" très fortement déséquilibrés (~50 cm), donne naissance à trois pics de coïncidences, parmi lesquels seul le pic central porte la signature de l'intrication. Il faut donc définir une fenêtre temporelle d'analyse des coïncidences d'une centaine de picosecondes qui établit la précision attendue pour la synchronisation des utilisateurs.

Prenons l'exemple d'une expérience de mesure d'intrication en énergie-temps. Sur table optique, il faut réunir un laser de pompe d'une grande longueur de cohérence, un cristal non linéaire et des analyseurs

capables de mesurer les temps d'arrivée ou l'énergie de chaque photon de la paire. En pratique, les corrélations temporelles sont mesurées à l'aide d'un dispositif de datation (time-digital-converter) de haute

### LE REGARD DE LA CRYPTANALYSE PAR ANTHONY MARTIN

La cryptanalyse est une part importante du développement des protocoles de distribution quantique de clés de chiffrement. En pratique, les cryptanalystes vont décortiquer et étudier l'implémentation des systèmes d'échange de clés quantiques afin de trouver des failles de sécurité en exploitant des imperfections de certains éléments des dispositifs, mais aussi à des manipulations malveillantes par le fournisseur d'équipement lui-même qui peut introduire des "portes dérobées". À titre d'exemple les protocoles BB84 ou BB92 sont qualifiés de sûrs selon certaines hypothèses qui portent notamment sur le principe de fonctionnement des équipements utilisés.

Une voie explorée par les scientifiques vise le développement de nouveaux protocoles dont la sécurité est indépendante des dispositifs (DIQKD), c'est à dire qu'elle ne nécessite aucune confiance dans les appareils utilisés. Le principe de la DIQKD repose sur des tests de non-localité quantique, tels que les inégalités de Bell, pour assurer la sécurité. En utilisant des corrélations quantiques qui ne peuvent pas être expliquées par des modèles locaux et déterministes, la DIQKD permet de détecter toute tentative d'espionnage ou de manipulation par un tiers. Ainsi, la sécurité de la clé générée dépend uniquement des lois fondamentales de la mécanique quantique.

La DIQKD offre ainsi une robustesse accrue face à des attaques sophistiquées et est considérée comme un pas important vers des communications quantiques ultra-sécurisées. Cependant, sa mise en œuvre hors des laboratoires pose encore des défis techniques importants, notamment en termes de taux de génération de clés et de tolérance aux pertes.

précision qui exploite une horloge ultraprécise (de l'ordre de la picoseconde) pour attribuer à chaque détection des étiquettes temporelles qui servent à identifier les corrélations en post-traitement (voir l'article photoniques [2]). Cette précision est couramment atteinte en laboratoire avec de simples horloges à base d'oscillateurs à quartz dont la stabilité de fréquence centrale est de l'ordre de  $10^{-9}$  Hz. La même horloge étant utilisée pour dater tous les événements, sa stabilité importe peu puisque les corrélations font intervenir les intervalles de temps relatifs entre des événements quasi simultanés. Le problème est bien différent dès lors que l'on sort du laboratoire : chaque site de réception dispose de sa propre échelle de temps, dont la synchronisation relative, pourtant essentielle, n'est pas garantie au-delà de quelques secondes. Les opérateurs mobiles offrent le même genre de service à nos portables, ou les satellites à nos GPS, mais avec des précisions bien en-deçà des attendus pour les protocoles de communication quantique. Cet aspect technologique est un axe de recherche important du réseau de recherche en métrologie du temps FIRST-TF [3].

### LE REGARD DE LA MÉTROLOGIE PAR LAURENT LABONTÉ

Les réseaux quantiques offrent une opportunité unique pour la métrologie quantique, permettant des avancées inaccessibles aux approches classiques ou aux états quantiques isolés. En reliant des capteurs distribués sur un territoire à l'aide d'états intriqués au sein d'un réseau quantique, il devient possible de mesurer des paramètres globaux avec une précision surpassant celle obtenue par des capteurs indépendants. Ce principe repose sur l'exploitation des corrélations quantiques établies entre les capteurs, autorisant une estimation collective plus performante.

Par exemple, un réseau de gravimètres quantiques ou de capteurs optiques intriqués pourrait détecter des variations infimes de gravité ou d'activités sismiques sur de vastes régions, permettant d'envisager l'anticipation des catastrophes naturelles en géophysique ou de meilleures performances en navigation inertielle. De même, la synchronisation d'horloges atomiques réparties sur un réseau pourrait révolutionner les systèmes GPS et les communications, en offrant une précision sans précédent [4]

En ce qui concerne les corrélations en énergie, on mesure la somme des énergies de chaque photon de la paire *via* une paire d'interféromètres fortement déséquilibrés mais identiques. Il s'agit alors de stabiliser les interféromètres l'un par rapport à l'autre. En laboratoire, à l'abri de toutes perturbations, il est assez facile d'obtenir deux interféromètres avec une stabilité relative meilleure que  $\lambda/100$  sur quelques heures. Mais

dès lors que les interféromètres sont placés dans deux laboratoires différents, cette stabilité relative devient un casse-tête... On entre alors sur les platebandes du projet REFIMEVE qui s'attache d'assurer le transfert d'une fréquence optique ultra-stable sur longue distance.

Le dernier point à mettre en avant est le flux de données échangées au cours d'une expérience de distribution quantique de clef. ●●●

— SPECTROGON

State of the art products

#### Filtres Interférentiels

De 200 à 15000 nm

- Passe-bande
- Passe-haut
- Passe-bas
- Large bande
- Densité neutre
- Disponible en stock



#### Réseaux Holographiques

De 150 à 2000 nm

- Compression d'impulsion
- Télécom
- Accordabilité spectrale
- Monochromateurs
- Spectroscopie
- Disponible en stock



UK (parle français): sales.uk@spectrogon.com • Tel +44 1592770000  
 Sweden (headquarters): sales.se@spectrogon.com • Tel +46 86392800  
 US: sales.us@spectrogon.com • Tel +1 9733311191

www.spectrogon.com



**Figure 2.** Plan du réseau Quantum@UniCA. Il s'étend sur une centaine de kilomètres avec 4 nœuds offrant tout l'équipement nécessaire pour produire et détecter des photons intriqués mais aussi analyser les corrélations temporelles inter-nœuds.

Un calcul rapide montre qu'une dizaine de millions de détecteurs de photons dont l'heure d'arrivée (à la picoseconde près) et le numéro d'identification codés sur 64 bits requiert un débit d'information d'environ 640Mbit/s, facilement assuré par une connexion USB3 courte distance mais moins trivialement assuré *via* une connexion ethernet sur des kilomètres. Si par ailleurs le traitement des clefs se fait à la volée, il faut donc y ajouter les étapes classiques de réconciliation, d'estimation et de correction des

erreurs qui sont très gourmandes en données.

### LE RÉSEAU QUANTUM@UNICA

Il s'agit d'un réseau de fibres optiques dédié aux expériences de communication quantique. Ces fibres évitent donc soigneusement tout appareillage télécom (switch, amplificateur...) et ne transportent aucun autre type de signal optique que des états quantiques. C'est un véritable banc d'essai fourni par Orange aux chercheurs d'INPHYNI qui relie les sites d'Université Côte d'Azur (campus

Valrose à Nice centre, campus Plaine du Var à Nice ouest), le centre INRIA à Sophia-Antipolis et enfin le laboratoire GéoAzur de l'observatoire de la Côte d'Azur à Caussol (voir figure 2). En pratique, il est constitué d'une centaine de brins de fibre optique standard aboutés les uns aux autres pour obtenir un unique lien de 100 km présentant des pertes totales de 35 dB, c'est-à-dire à l'état de l'art mondial. Trois des quatre nœuds sont équipés de détecteurs de photons, d'un système de datation temporelle et des moyens de communication très haut débit. Les sites de l'éco-vallée et de l'INRIA sont de simples salles serveur, tandis que les sites de Nice-centre et de GéoAzur sont de véritables laboratoires. En outre, le nœud de Caussol est connecté au télescope d'observation astronomique pour préparer les futurs liens spatiaux par satellite.

### PRÉPARATION DE DISPOSITIFS QUANTIQUES POUR UNE UTILISATION HORS LABORATOIRE

La première contrainte rencontrée est le standard d'intégration des équipements électroniques qui impose l'utilisation de boîtes de dimension 425 × 245 mm, et de composants à fibre optique pour la miniaturisation, ainsi que la gestion des flux thermiques afin de garantir la stabilité des interféromètres. Il faut également garder à l'esprit que ces boîtes sont difficiles d'accès en temps réel pour assurer leur réglage et leur diagnostic. Tous les paramètres

**Figure 3.** Travail d'intégration sur la source et les analyseurs de corrélation énergie-temps. La boîte "source" contient un laser à 780 nm, un guide d'onde non linéaire et des composants de routage/filtrage. Les boîtes "Alice" et "Bob" contiennent des interféromètres à base de fibre optique nichés dans des boîtiers thermiquement stabilisés. La partie électronique, pilotable à distance, qui gère la stabilisation en température, la puissance du laser et la phase des interféromètres est commune aux trois boîtes. Crédit image Y. Pelet (INPHYNI/CNRS).



## LE REGARD DES MÉMOIRES PAR JEAN ETESSE

Les distances sur lesquelles il est possible de réaliser des protocoles de communication quantique sont limitées, et pour repousser celles-ci les liens peuvent être fractionnés en liens élémentaires plus courts. C'est le principe des 'répéteurs quantiques', nécessitant une capacité de synchronisation. Les mémoires quantiques, dispositifs capables de stocker et de réémettre les excitations photoniques à la demande, lèvent ce verrou et des preuves de concept voient actuellement le jour dans les réseaux quantiques.

Les mémoires quantiques photoniques à l'état de l'art sont actuellement développées dans les cristaux dopés avec des ions de terres rares d'une part et avec des atomes alcalins refroidis d'autre part, permettant, selon la technologie, d'atteindre des temps de stockage de plusieurs heures ou des efficacités de stockage de plus de 90%. L'enjeu actuel de ces technologies est de concentrer sur une plateforme unique les performances requises pour un développement à grande échelle [5].

(puissance du laser, polarisation de sortie, phase des interféromètres, température...) doivent donc être pilotables à distance *via* un ordinateur connecté à internet.

### LA SYNCHRONISATION DES UTILISATEURS

Il ne s'agit pas à proprement parler de synchronisation mais de syntonisation des deux horloges : celles-ci n'affichent pas forcément la même heure mais la durée d'une seconde doit être la même. Il est toutefois impossible que cette durée soit rigoureusement identique entre les horloges, et nous devons donc nous demander : quel écart-type est acceptable pour notre expérience ? Et par conséquent, quel est le temps caractéristique de rétroaction nécessaire ? L'écart-type acceptable est défini par la largeur de la fenêtre d'analyse des coïncidences (voir figure 1) qui est de l'ordre d'une centaine de picosecondes. Puisqu'il n'est pas suffisant de faire appel aux signaux GPS dont la précision est de l'ordre de la nanoseconde, nous avons choisi d'utiliser des horloges rubidium locales. La stabilité de ces dernières, de l'ordre d'une dizaine de picosecondes par seconde, permet un asservissement à l'échelle de la seconde. Cela

permet d'exploiter directement les corrélations quantiques pour mesurer le glissement des horloges et effectuer la correction nécessaire sur l'une des deux horloges. Ce choix impose des contraintes fortes sur la partie optique et sur le traitement des données. Il faut en effet disposer de suffisamment d'échantillons de détection et d'un ordinateur suffisamment puissant pour calculer une fonction de corrélation significative,

le tout en moins d'une seconde ! Les pertes à la propagation qui limitent le taux de détection, représentent le principal facteur limitant la distance maximale atteignable du réseau azuréen.

### LA STABILISATION DES INTERFÉROMÈTRES

Les interféromètres (de type Mach-Zehnder) fortement déséquilibrés, formant un interféromètre dit de « Franson », agissent comme des « analyseurs en énergie » pour chaque paire de photons. L'intrication se cache dans la dépendance des corrélations à la somme des phases respectives de chaque interféromètre. Il s'agit donc d'asservir la phase d'un interféromètre sur l'autre pour que la somme des déséquilibres soit en permanence un multiple de  $2\pi$ . Là encore, nous avons choisi d'optimiser la stabilisation passive des interféromètres (vibration, température, humidité...) afin de limiter le décalage en phase de quelques  $\pi$  par jours et de directement exploiter les corrélations quantiques pour mesurer le glissement des phases. C'est la mesure des corrélations en énergie qui est ●●●

## LE REGARD DES VARIABLES CONTINUES PAR VIRGINIA D'AURIA

L'encodage de bits d'information quantique sur les photons uniques n'est pas le seul possible. Il est également possible d'exploiter les aspects de la lumière davantage liés à sa nature ondulatoire (encodage à variables continues) et ainsi d'hybrider les deux types d'encodage. Ce dernier type d'approche se base sur la manipulation d'états de la lumière grâce à l'association des détecteurs capables de compter des photons et d'interféromètres homodyne optiques, proches de ceux utilisés, par exemple, dans les radios du passé.

Cette technique permet d'obtenir des états de la lumière hautement non-classiques, tels que des chatons de Schrödinger, ainsi que des états intriqués dit « hybrides », qui donnent la possibilité de tirer profit des deux types d'encodage. Les états hybrides optiques sont étudiés, entre autres, pour la préparation à distance d'états quantiques, ainsi que comme des ressources prometteuses permettant de réduire l'impact des pertes à la propagation dans les protocoles de téléportation et, plus en général, d'interfacer des technologies quantiques différentes situées aux nœuds d'un réseau quantique [6].

## LE QUANTIQUE AU CRIBLE DES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES PAR ERIC PICHOLLE

Les défis posés aux sciences humaines et sociales sont multiples, de la caractérisation d'un changement de paradigme au moment même où il s'opère aux problèmes méthodologiques inédits qu'il suscitera inévitablement. Une technologie qui sort de sa "bulle" académique se trouve rapidement confrontée à de nouvelles contraintes. Techniques, on l'a vu, mais aussi humaines et sociales. Économiques, bien sûr : le Plan Quantique National dit assez le sérieux des enjeux de la seconde révolution quantique. Mais aussi éducatives et didactiques (Comment former au quantique ses futurs techniciens de terrain ? Peut-on en parler dès le lycée ? Voir le collège ?) ; juridiques (Qui est responsable d'une information encore indéterminée ? Pour anticiper les risques de technologies encore largement spéculatives, comme l'ordinateur quantique, vaut-il mieux un droit "dur", des normes explicites – mais lesquelles ? –, ou un droit "souple", avec des règles procédurales adaptatives à définir par les entreprises elles-mêmes ?) ; le modèle de développement de pépites quantiques à la française est-il comparable, en termes d'anthropologie d'entreprise, à celui des start-up de la Silicon Valley d'hier, ou même des jeunes pousses de l'IA ?

utilisée pour calculer le signal de rétroaction à appliquer sur un des deux interféromètres imposant par conséquent les mêmes contraintes sur le traitement des données que pour la synchronisation.

### LES DÉFIS LIÉS AU POST-TRAITEMENT TEMPS RÉEL

Un protocole de QKD ne se réduit pas à l'échange entre Alice et Bob des temps associés aux photons détectés, qui représentent déjà plusieurs centaines de Mbits par seconde. Si l'objectif est d'établir des clefs entre sites distants en temps réel, il s'agit de traiter simultanément la réconciliation des bases de mesures, d'effectuer la correction des erreurs éventuelles et enfin d'effectuer l'amplification de la sécurité (voir article de N. Sangouard). Du fait de ces processus itératifs, la bande passante effectivement requise est, pour ce réseau, d'environ 1 Gbit/s. Au moindre ralentissement, c'est toute la chaîne de traitement de données qui s'effondre et le protocole qui s'arrête. Il faut donc s'assurer d'une connexion optique très haut débit de bout en bout.

### LA RÉSILIENCE PAR L'AUTOMATISATION

Un des aspects novateurs de l'expérience azurée réside dans son autonomie. La liste des erreurs qui interrompent le protocole de QKD est en effet assez longue : le taux d'erreur (QBER) au-delà de 11%, perte de la synchronisation ou de l'asservissement des interféromètres, arrêt momentané des détecteurs... Un important travail de programmation sous LabVIEW a été mis en place pour assurer la détection et le diagnostic des erreurs, ainsi que le redémarrage

de l'ensemble du protocole de QKD le cas échéant. Nous avons ainsi pu maintenir un échange de clefs pendant plus de 300 h sans intervention humaine [1].

### CONCLUSION

Le tour de force de l'expérience de QKD azurée va bien au-delà de l'exploitation des idées issues de la physique quantique : c'est tout un ensemble de technologies habilitantes, "classiques" pour la plupart, qui permettent aux technologies quantiques de sortir du laboratoire. Sans les développements expérimentaux sur le partage de référence de fréquence ou de référence de temps, il eût été impossible d'imaginer un lien de communication quantique déployé sur quelques dizaines de kilomètres. Les liaisons haut-débit au sol sont désormais largement disponibles, mais d'importants efforts sont maintenant attendus par tous les acteurs (académiques comme industriels) pour partir à la conquête de l'espace et de ses satellites, pour lesquels toutes ces questions de synchronisation, de stabilisation et de flux de données se compliquent encore en raison de l'effet doppler et des corrections relativistes qui ne sont plus alors négligeables. C'est cette quête du dépassement qui réunit les chercheurs, les ingénieurs, les techniciens de l'optique, de l'électronique et du spatial autour des technologies quantiques. ●

## RÉFÉRENCES

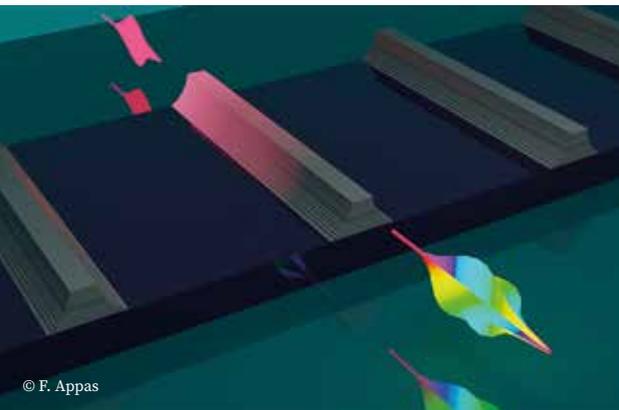
- [1] Y. Pelet, G. Sauder, M. Cohen, L. Labonté, O. Alibart, A. Martin, S. Tanzilli, *Phys. Rev. Applied* **20**, 044006 (2023)
- [2] O. Alibart, V. D'Auria, G. Sauder, L. Labonte, S. Tanzilli, *Photoniques* **91**, 38 (2018)
- [3] <https://first-tf.fr/>
- [4] Liu, Li-Zheng *et al*, *Nature Photonics* **15**, 137 (2021)
- [5] D. Lago-Riviera *et al.*, *Nat. Comun.* **14**, 1889 (2023)
- [6] G. Guccione *et al.*, *Sci. Adv.* **6**, eaba4508 (2020).

# GÉNÉRATION DE PHOTONS INTRIQUÉS POUR LES COMMUNICATIONS QUANTIQUES AVEC DES DISPOSITIFS NON-LINÉAIRES AlGaAs

Othmane MESKINE, Lorenzo LAZZARI, Marco RAVARO, Florent BABOUX et Sara DUCCI\*

Université Paris Cité/Laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques CNRS UMR7162, Paris, France

\*sara.ducci@u-paris.fr



© F. Appas

**Les photons intriqués forment une ressource précieuse pour la distribution quantique de clés et l'implémentation de réseaux quantiques flexibles. Cet article présente les dernières avancées réalisées avec des sources AlGaAs intégrées, exploitant la fluorescence paramétrique pour générer des photons intriqués en polarisation ou en énergie-temps. Ces dispositifs combinent une large bande spectrale, une brillance élevée et une forte intégrabilité, permettant de progresser vers le déploiement hors-laboratoire des communications quantiques.**

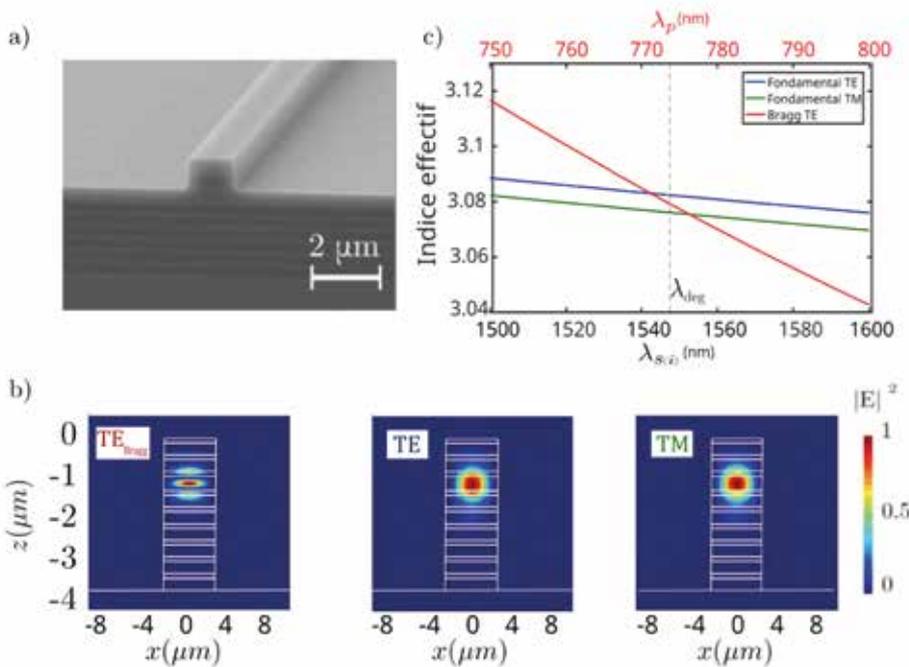
<https://doi.org/10.1051/photon/202513041>

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.

**P**armi les différents types de supports d'information quantique, les photons se distinguent par leur robustesse à température ambiante, la compatibilité avec les infrastructures de communication et de détection existantes, et la disponibilité de dispositifs optiques performants. Dans le contexte des communications

quantiques, l'intrication constitue une ressource précieuse sans équivalent classique ouvrant la voie à une multitude d'applications, comme la distribution quantique de clés dans des architectures sans nœuds de confiance, le codage super-dense et, plus généralement, l'implémentation de réseaux quantiques [1]. En considérant le cas des variables discrètes, l'intrication entre deux photons peut

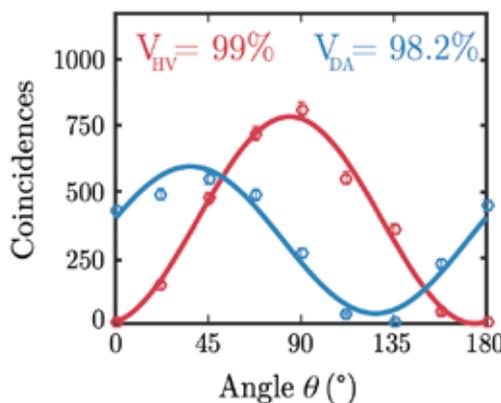
exister dans divers degrés de liberté décrits soit dans des espaces de dimension 2 (polarisation, énergie-temps, bin temporel...), soit dans des espaces de dimension  $N$  (fréquence, mode spatial, moment orbital angulaire...), ou bien simultanément dans plusieurs degrés de liberté (on parle alors d'hyper-intrication). Afin de répondre aux contraintes du fonctionnement en situations réelles et de permettre ●●●



**Figure 1.** a) image d'un guide AlGaAs à miroirs de Bragg réalisée au microscope optique à balayage; b) simulation numérique du profil spatial des modes guidés impliqués dans le processus de conversion paramétrique spontanée (SPDC) utilisé pour la génération de paires de photons; c) dispersion des indices effectifs  $n_{eff}$  des modes impliqués dans la conversion. La condition d'accord de phase est obtenue par ingénierie de la structure multicouche de sorte que  $n_{eff}^p = n_{eff}^s + n_{eff}^c$

le développement de systèmes quantiques à grande échelle, de nombreux efforts sont actuellement dédiés au passage de systèmes optiques traditionnels massifs vers des dispositifs photoniques intégrés compacts. Ce changement est rendu possible par les progrès rapides des circuits photoniques intégrés classiques, qui ont permis de démontrer la génération, manipulation et détection d'états quantiques de la lumière, une grande stabilité de phase et l'intégration de plusieurs fonctionnalités sur puce. Au cours des dernières années de nombreux composants photoniques quantiques intégrés basés sur divers matériaux ont été développés [2]; dans cet article nous présentons les avancées récentes sur les sources non-linéaires de paires de photons intriqués basées sur l'AlGaAs natif. Cette plateforme rassemble plusieurs atouts : elle présente des non-linéarités du second et du troisième ordre parmi les plus élevées des matériaux

**Figure 2.** Courbes de corrélations obtenues en mesurant la détection de coïncidences entre les photons de la paire séparés à la sortie du guide et analysés avec des polariseurs linéaires. Les mesures sont effectuées en utilisant 2 bases différentes : HV (DA) correspondant respectivement à un polariseur orienté avec axe de transmission horizontal (diagonal) et l'autre avec axe formant un angle  $\theta$  par rapport au premier. Cela permet de montrer que l'intrication existe indépendamment de la base choisie pour effectuer la mesure (figure adaptée de [5]).



couramment utilisés, ce qui permet de générer des paires de photons par conversion paramétrique spontanée à trois ondes ou à quatre ondes. De plus, elle présente une bande interdite directe, ouvrant la voie à l'intégration monolithique de diodes laser dans des puces photoniques quantiques, ainsi qu'un coefficient électro-optique élevé permettant une manipulation ultrarapide sur puce d'états à un ou deux photons [3]. Parmi les différents processus de génération d'états intriqués pour les communications quantiques, nous nous concentrons ici sur la conversion paramétrique spontanée à trois ondes, en particulier dans des guides d'ondes AlGaAs basés sur des miroirs de Bragg.

**GÉNÉRATION D'ÉTATS INTRIKUÉS LARGE BANDE AVEC DES GUIDES AlGaAs**

Dans le processus de conversion paramétrique, les photons d'un faisceau laser de pompe d'énergie  $\hbar\omega_p$  sont convertis de manière probabiliste en paires de photons, généralement appelés signal et complémentaire, d'énergie  $\hbar\omega_s$  et  $\hbar\omega_c$ , respectivement. Pour obtenir une efficacité de conversion maximale lors du processus, l'énergie doit être conservée ainsi que le vecteur d'onde des modes optiques en interaction (condition d'accord de phase). Dans le cas présent, la différence de vitesse de phase due à la dispersion chromatique est compensée par l'ingénierie des modes en interaction : deux miroirs de Bragg assurent à la fois le confinement par bande interdite photonique pour un mode de Bragg transverse électrique (TE) autour de  $\lambda_p = 775$  nm et par réflexion totale interne pour les modes fondamentaux transverse électrique (TE) et transverse magnétique (TM) autour de  $\lambda_{s,c} = 1550$  nm

<sup>1</sup> D'autres processus de conversion impliquant des photons de polarisation différente peuvent aussi se produire à des longueurs d'onde différentes, du fait de la forme du tenseur non-linéaire de l'AlGaAs.

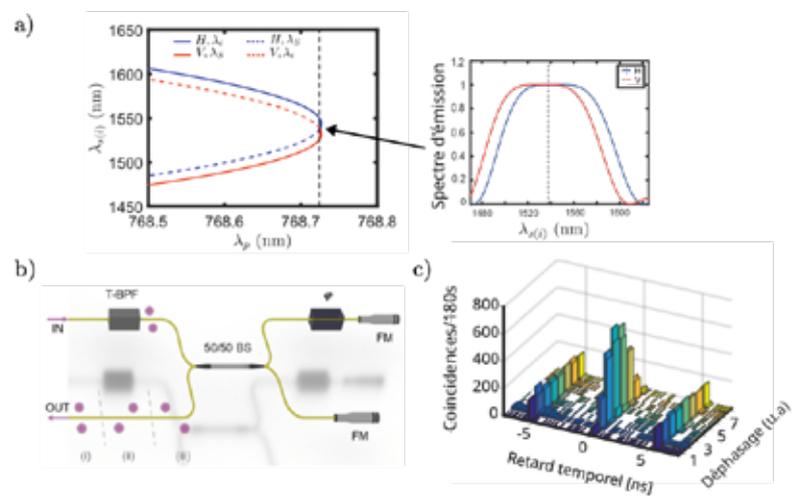
(Fig. 1)<sup>4</sup>. La croissance des échantillons est effectuée par épitaxie par jets moléculaires, et la fabrication des guides est réalisée suivant des techniques standard de lithographie et gravure utilisées pour les semi-conducteurs III-V. Le taux typique de génération de paires de photons est de  $\sim 10^6\text{-}10^7\text{ s}^{-1}$ , les pertes optiques de  $0.4\text{ dB.cm}^{-1}$  [4]. Dans le contexte des communications quantiques, la capacité à émettre des paires de photons intriqués sur une large gamme spectrale dans la bande C des télécommunications est particulièrement intéressante, car la capacité du réseau est proportionnelle à la bande spectrale des états utilisés pour partager l'intrication. Par conséquent il y a un intérêt croissant pour le développement de sources miniaturisées de photons intriqués à large bande.

Ici nous nous intéressons à deux degrés de libertés largement utilisés pour la distribution d'intrication : la polarisation et l'énergie-temps. Pour produire des paires de photons intriqués, il doit exister deux façons possibles et indiscernables de créer ces paires. Cela peut se produire soit à l'intérieur de la source elle-même, soit par une post-manipulation à l'aide d'optiques supplémentaires après la source et une post-sélection au niveau des détecteurs. Dans l'encart nous décrivons comment des états intriqués en polarisation de type  $|\Psi\rangle_{\text{pol}} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H_s V_c\rangle + |V_s H_c\rangle)$ , ainsi que des états intriqués en énergie-temps  $|\Psi\rangle_{\text{en-temps}} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|C_s C_c\rangle + e^{i\varphi}|L_s L_c\rangle)$  peuvent être produits en utilisant les sources AlGaAs. Ces états correspondent à une superposition cohérente entre deux configurations possibles (les états de polarisation horizontale (H) ou verticale (V) dans le premier cas, et les états correspondant à l'emprunt d'un chemin court (C) ou long (L) dans le second cas). La fidélité d'états produits expérimentalement à ces états maximalement intriqués (états de Bell) peut être quantifiée par des mesures de corrélation (Fig. 2, Fig. 3). Cette fidélité est dans les deux cas très élevée sur une

large bande spectrale (par exemple pour les états intriqués en polarisation, la fidélité est supérieure à 95% sur une bande de 26 nm), ce qui permet d'implémenter de la distribution d'intrication sur plusieurs canaux de fréquence en parallèle, comme c'est le cas pour le transport d'information

classique dans les fibres optiques. À titre d'exemple, dans le cadre d'une collaboration avec Nokia Bell-Labs et le Laboratoire d'Informatique de P6 (SU), nous avons combiné les propriétés des états générés par ces dispositifs avec des techniques de multiplexage en longueur d'onde à grille ●●●

## GÉNÉRATION D'INTRICATION EN POLARISATION ET ÉNERGIE-TEMPS

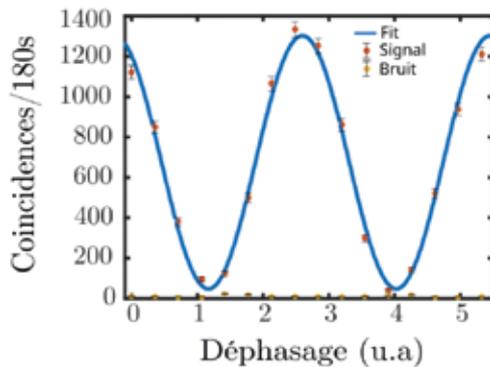


Le processus de conversion paramétrique spontanée permet de générer de paires des photons intriqués en polarisation et en énergie-temps. En ce qui concerne la polarisation, dans les guides AlGaAs on exploite un processus non-linéaire de type 2, dans lequel les photons générés sont polarisés orthogonalement. Deux interactions possibles ont lieu dans le processus de conversion : la première génère un photon signal polarisé H et un photon complémentaire polarisé V, tandis que la seconde produit l'inverse, un photon signal polarisé V et un photon complémentaire polarisé H (a). Grâce à la faible biréfringence du dispositif ces deux interactions sont indiscernables, ce qui donne lieu à la superposition cohérente des deux états possibles, et donc à l'intrication. En ce qui concerne l'intrication énergie-temps, on exploite la simultanéité d'émission des 2 photons de la paire en pompant le dispositif avec un laser continu et on utilise un interféromètre de Franson déséquilibré dans lequel on fait circuler les photons (b). Quatre situations possibles peuvent se produire : les 2 photons empruntent le bras court, ou les 2 le bras long, ou celui polarisé H le long et celui polarisé V le court ou vice-versa. En mesurant le signal de coïncidences en fonction du retard temporel entre les instants de détection des 2 photons on obtient une figure avec 3 pics (c) ; les pics satellites correspondent aux situations où les photons ont emprunté des bras de longueur différente. Le pic central correspond aux événements où les photons ont emprunté des chemins de même longueur. En se mettant dans la condition où le temps de cohérence du faisceau de pompe est supérieur à la différence entre les temps de parcours dans les deux bras de l'interféromètre et au jitter des détecteurs, eux-mêmes supérieurs au temps de cohérence des photons générés, le pic central résulte de la superposition cohérente entre les 2 états avec un déphasage  $\varphi$  contrôlable avec un étireur piezo de fibre sur un des deux bras.

flexible de qualité industrielle, afin de démontrer la distribution reconfigurable de l'intrication entre plusieurs utilisateurs [5]. Les photons de chaque paire sont séparés de façon déterministe dans des canaux de fréquence appariés en énergie et sont distribués aux utilisateurs du réseau à l'aide d'un commutateur programmable sélectif en longueur d'onde. Les performances du réseau sont évaluées en implémentant un protocole de distribution quantique de clés entre deux utilisateurs basé sur l'intrication en polarisation sur des liaisons optiques fibrées en laboratoire. Un taux de clé positif est extrapolé pour des distances allant jusqu'à 75 km entre la source et les utilisateurs en utilisant le protocole de distribution de clés dit BBM92 [6] (Fig. 4). La large bande spectrale des photons intriqués émis par les sources AlGaAs permet de multiplexer jusqu'à 76 canaux de la norme UIT (Union Internationale des Télécommunications) de largeur 100 GHz, ouvrant la possibilité de distribuer des clés à 36 paires d'utilisateurs en parallèle. Il est aussi possible d'implémenter des réseaux reconfigurables totalement connectés de N utilisateurs où chaque utilisateur partage de l'intrication avec les N-1 autres ; nous avons démontré par exemple un réseau graphe de 8 utilisateurs. Par ailleurs l'utilisation de commutateurs programmables avec canaux de largeur ajustable permet de contrôler le débit de transmission en tenant compte de contraintes, par exemple en allouant un canal de fréquence plus large pour un utilisateur qui se trouve à plus grande distance, donc subissant des pertes de propagation en fibre plus élevées.

**VERS DES CIRCUITS PHOTONIQUES QUANTIQUES HYBRIDES POUR LES COMMUNICATIONS QUANTIQUES**

L'utilisation de l'intrication en polarisation ou en énergie-temps pour des protocoles fiables et certifiés dans des réseaux de communications quantiques nécessite de disposer de sys-

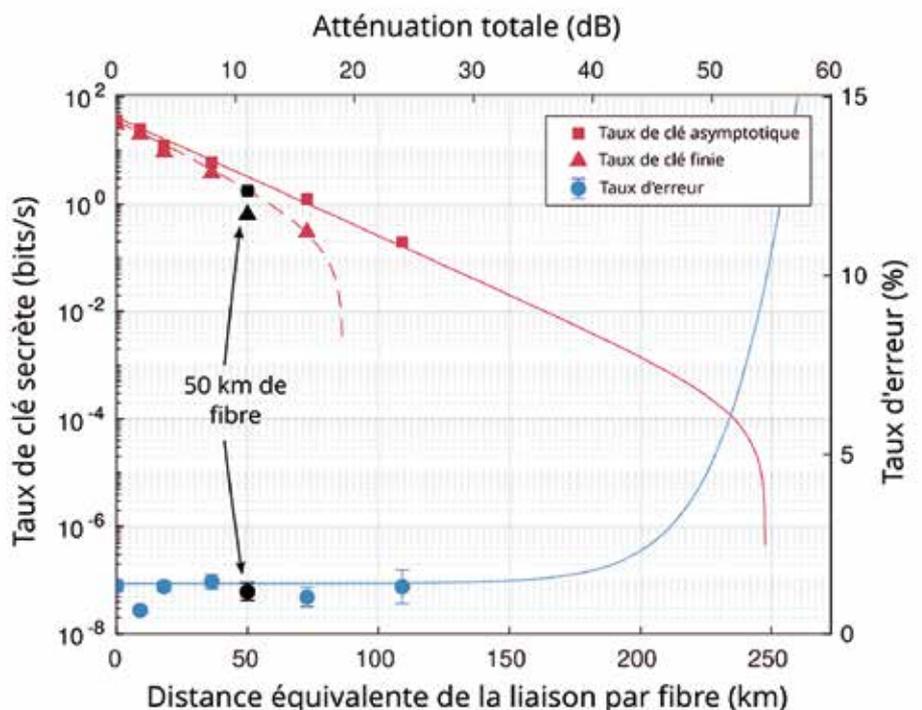


**Figure 3.** Courbe de corrélations obtenues en mesurant le nombre de paires de photons arrivant simultanément aux détecteurs en fonction du déphasage appliqué sur un des deux bras de l'interféromètre de Franson (voir panel b de l'encadré).

tèmes de contrôle et de stabilisation de ces degrés de liberté dans l'ensemble du système : des dispositifs automatisés de contrôle de la dérive de polarisation dans les fibres ont

ainsi été développés ainsi que des interféromètres de Franson stabilisés. Évidemment, pour des questions de praticité et de coûts il est souhaitable de réduire à leur minimum le nombre de composants nécessaires au déploiement de ces nouvelles technologies. Dans le cas de l'intrication énergie-temps, ce type de problème peut être résolu en fabriquant des interféromètres de Franson directement sur la puce qui contient la source de paires de photons et, dans ce contexte, la plateforme Silicium est idéale grâce à sa compatibilité avec la fabrication CMOS - la technologie de fabrication des composants électroniques - et à la riche librairie de composants photoniques déjà développés. Ce matériau, en revanche, ne présente pas de non-linéarité optique du second ordre, ni de bande interdite directe. Il y a donc un intérêt croissant pour le développement de circuits photoniques hybrides,

**Figure 4.** Taux de clé asymptotique et tenant compte de l'effet de taille finie de la série de bits, pour un lien entre 2 utilisateurs connectés par les canaux 23 et 29 de largeur 100 GHz de la grille ITU, en fonction de la distance parcourue dans la fibre (axe inférieur) et de l'atténuation (axe supérieur). Les symboles représentent les données expérimentales et les lignes continues les prévisions théoriques pour un schéma BBM92. Les taux de clés finies sont estimés en supposant une taille de bloc de 10 minutes (figure adaptée de [5]).





**Figure 5.** Dessin de la structure hybride AlGaAs/SOI : le faisceau de pompe produit par SPDC des paires de photons dans un guide d'onde AlGaAs à miroirs de Bragg (structure multicouche en gris). Ces paires sont ensuite transférées dans un guide SOI (en bleu) collé monolithiquement. Dans ce dispositif, les propriétés d'intrication des photons sont conservées et le faisceau de pompe est filtrée par absorption dans la partie SOI (figure adaptée de [7]). Crédit M. Karr-Ducci.

c'est-à-dire intégrant des composants réalisés dans différentes plateformes matérielles, pour combiner les atouts de chaque matériau tout en compensant leurs limitations respectives, permettant d'obtenir des fonctionnalités accrues. Dans le cadre d'une collaboration avec STMicroelectronics, C2N et INPHYNI nous avons démontré un dispositif hybride dans lequel des paires de photons intriqués sont générées dans un guide AlGaAs et ensuite transférées vers un guide en silicium sur isolant, qui est collé de manière adhésive au premier [7]. Ce processus de transfert est conçu pour transmettre uniquement les paires de photons tout en filtrant le laser de pompe externe et en préservant leurs propriétés essentielles pour des applications pratiques, à savoir leur brillance, large bande passante et haute qualité d'intrication. Ce dispositif permet d'envisager des protocoles d'information quantique

entièrement intégrés sur puce : tandis que les éléments de manipulation requis sont prêts à être intégrés du côté silicium, la bande interdite directe de l'AlGaAs peut être exploitée pour intégrer le laser de pompe au sein du même dispositif.

#### CONCLUSION

Les dispositifs non-linéaires intégrés à base d'AlGaAs constituent une plateforme prometteuse pour les communications quantiques, grâce à leur capacité à générer des photons intriqués à large bande spectrale et dans plusieurs degrés de liberté, bien adaptés aux réseaux quantiques. Ces dispositifs peuvent être réalisés de façon monolithique ou hybride pour combiner les atouts de différentes technologies, ouvrant la voie à des circuits photoniques quantiques compacts et autonomes pour des applications en conditions réelles des protocoles d'information quantique. ●

## RÉFÉRENCES

- [1] Z. Zhang *et al.*, *Adv. Opt. Photonics* **16**, 62 (2024)
- [2] E. Pelucchi *et al.*, *Nature Reviews Phys.* **4**, 194 (2022)
- [3] F. Baboux, G. Moody, S. Ducci, *Optica* **10**, 917 (2023)
- [4] F. Appas, O. Meskine, *et al.*, *J. Lightwave Technol.* **40**, 7658 (2021)
- [5] F. Appas *et al.* *npj Quantum Inform.* **7**, 118 (2021)
- [6] C.H. Bennet, G. Brassard, N.D. Mermin, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 557 (1982)
- [7] J. Schuhmann, L. Lazzari *et al.*, *Phys. Rev. X Quantum* **5**, 040321 (2024)



PICOQUANT

par **OPTON LASER**  
INTERNATIONAL

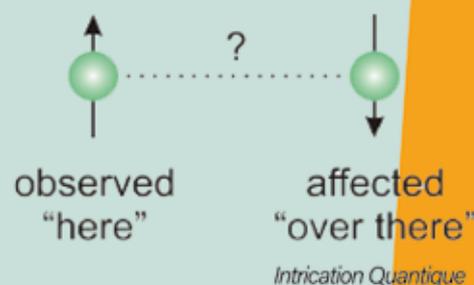
NEW!

## HYDRAHARP 500

UNITÉ TCSPC ET MARQUEUR  
TEMPOREL D'ÉVÈNEMENTS  
MULTIVOIES ET HAUTE RÉOLUTION



- ▲ Précision temporelle exceptionnelle de 2 ps RMS par canal, 3 ps RMS entre canaux
- ▲ Résolution temporelle de pointe de 1 ps
- ▲ Extensible jusqu'à 16+1 canaux avec configuration de canaux avancée
- ▲ Temps mort ultra-court de 680 ps, pas de temps mort entre canaux
- ▲ Marquage temporel soutenu avec jusqu'à 85 Mcps via USB 3.0 & jusqu'à 1600 Mcps (eFPGA)



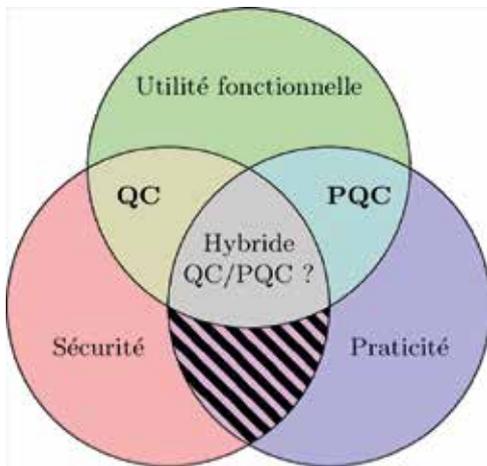
[www.optonlaser.com](http://www.optonlaser.com)

# APPROCHES HYBRIDES EN CRYPTOGRAPHIE QUANTIQUE

Romain ALLÉAUME\*, Tristan NEMOZ

Télécom Paris-LTCl, Institut Polytechnique de Paris, Inria, Palaiseau, France

\* romain.alleaume@telecom-paris.fr



La cryptographie quantique s'est largement définie comme visant une sécurité inconditionnelle, en alternative à la cryptographie dite classique reposant sur la difficulté calculatoire conjecturée de certains problèmes mathématiques. Plutôt que d'opposer cryptographie quantique et classique, hybrider approches calculatoires post-quantiques (PQC) et cryptographie quantique (QC) ouvre des perspectives nouvelles, pour une cryptographie pratique, plus sûre et offrant plus de fonctionnalités.

<https://doi.org/10.1051/photon/202513046>

La cryptologie, et souvent par abus de langage que nous reprendrons, la cryptographie, est l'art d'assurer qu'une communication entre deux parties. Elle possède des propriétés désirables, comme la confidentialité, l'intégrité ou l'authenticité. Aujourd'hui, deux paradigmes différents semblent s'affronter : celui de la cryptographie post-quantique et celui de la cryptographie quantique.

En 1994, Peter Shor publie un algorithme qui révolutionne le monde de la cryptographie. Il annonce que si des ordinateurs quantiques venaient à exister, la cryptographie telle qu'elle était à l'époque, et est toujours en grande partie aujourd'hui, s'effondrerait. En effet, il a prouvé qu'un ordinateur quantique peut efficacement résoudre des problèmes

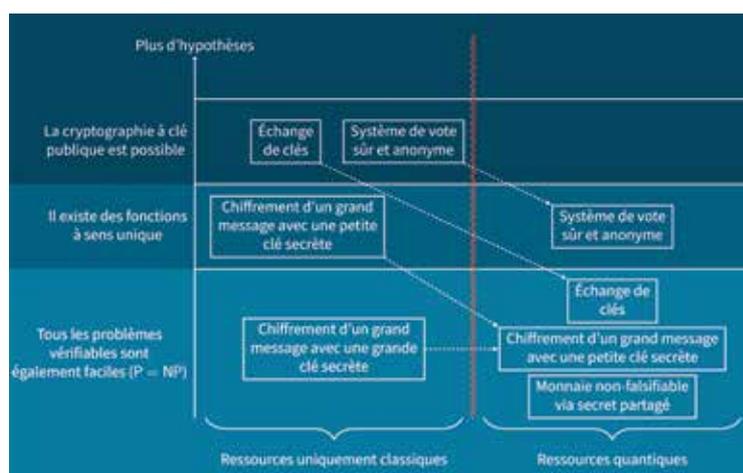
mathématiques tels que la factorisation, sur lesquels sont fondés une grande partie de la cryptographie à clé publique, essentielle pour le fonctionnement et la sécurité d'Internet.

Face à la menace de l'ordinateur quantique, deux réponses sont alors possibles. La première est celle de l'approche de la cryptographie post-quantique qui consiste à trouver d'autres problèmes semblant difficiles pour les ordinateurs quantiques et de baser les protocoles cryptographiques sur ces problèmes. Une fois de tels problèmes trouvés, une telle solution a l'avantage d'être assez facilement déployable par une modification de la pile logicielle, mais sans nécessiter de changements dans l'infrastructure de nos réseaux. En revanche, on reste exposé à la possibilité qu'une solution au nouveau problème mathématique soit finalement trouvée, ce qui nous ferait

revenir à la case départ. La seconde, c'est adopter une autre approche. C'est ce que propose la cryptographie quantique, où l'on fait en sorte que la sécurité du protocole repose non pas sur un problème mathématique, mais sur les lois de la physique quantique elles-mêmes. Le problème est alors inverse : bien qu'elle assure une sécurité parfaite en théorie, la cryptographie quantique reste délicate à mettre en œuvre. Elle fait de plus appel à du matériel spécifique comme les détecteurs d'états quantiques de la lumière et est limitée en débit et en distance.

Ainsi, chacune des deux approches effectue un compromis fondamentalement différent, ce qui a souvent mené à une opposition de ces deux paradigmes. Pourtant, il n'y a pas lieu de les opposer ! *A contrario*, on peut se demander s'il ne serait pas possible de tirer parti des forces ●●●

Dans cet article, nous avons souvent mentionné la notion de « niveau de sécurité » sans vraiment nous attarder dessus. Fondamentalement, le niveau de sécurité est relié aux hypothèses relatives à la complexité algorithmique des problèmes utilisés en cryptographie. Plus on fait d'hypothèses, plus on peut réaliser de fonctionnalités, mais réciproquement, plus on s'expose à ce que l'une des hypothèses soit fautive, et à des attaques. La figure 2, inspirée des cinq mondes d'Impagliazzo [4], présente une hiérarchie en trois niveaux de sécurité. Le niveau avec le moins d'hypothèse, correspond à celui où tous les problèmes qui sont vérifiables sont également calculables. Inversement, le deuxième niveau à un monde où les fonctions à sens unique existent, rendant possible le chiffrement d'un grand message avec une petite clé. Enfin le dernier niveau correspond à un monde où la cryptographie à clé publique est possible, i.e. où il existe des fonctions à sens unique avec des trappes. Autrement dit, non seulement les fonctions à sens unique doivent y exister, mais certaines d'entre elles permettent de faire le chemin inverse si l'on possède la bonne information.



**Figure.** Représentation graphique des niveaux de sécurité et de fonctionnalité. À niveau de fonctionnalité équivalent, la cryptographie quantique assure généralement une sécurité plus élevée.

L'intérêt de la cryptographie quantique est visible sur la Figure 2 : pour un niveau de fonctionnalité donné, le niveau de sécurité est généralement plus haut que pour son équivalent classique, voire n'a pas d'équivalent classique. C'est notamment le cas d'un système où une banque dispose d'une clé privée servant à signer les billets électroniques : rien n'empêche un attaquant de copier un billet et de le soumettre à nouveau à la banque. Cela n'est cependant pas possible si l'on utilise intelligemment des ressources quantiques.

Si l'on pousse ce raisonnement à l'extrême, cela permet même d'imaginer un monde qui correspondrait à la première ligne de la figure ci-dessus, même s'il est peu probable, dans lequel la cryptographie traditionnelle est impossible, tandis que la cryptographie quantique permet tout de même d'assurer un nombre conséquent de fonctionnalités.

**MCL**  
MAD CITY LABS INC.

**Precision Motion  
for Photonics**



**Piezo Nanopositioners**

Sub-nanometer precision  
Closed loop control  
Low noise, high stability



**Micropositioners**

Precision steps < 100nm  
Stepper motor driven  
High stability

**Custom Designs**

**European Office**

EU: +41 (0)44 803 98 18  
sales@madcitylabs.eu

[www.madcitylabs.com](http://www.madcitylabs.com)

de chacune de ces deux approches afin de dépasser les problèmes inhérents à chacune, *via* des protocoles hybrides notamment. Cette hybridation peut se faire naturellement de deux manières. Dans la première, on peut combiner deux protocoles, un quantique et un classique en parallèle. Dans la seconde, on va combiner des éléments post-quantiques, offrant une sécurité calculatoire directement avec des éléments quantiques.

### LES HYBRIDATIONS DES DEUX APPROCHES

#### L'hybridation parallèle

Le principe de l'hybridation parallèle consiste à utiliser à la fois une solution post-quantique et une solution quantique pour réaliser la même tâche. Par exemple dans le cas de l'échange de clés secrètes, il s'agirait d'utiliser un échange de clé post-quantique, tels que ceux proposés en 2023 après une large compétition internationale dédiée à la standardisation d'algorithmes de cryptographie post-quantique, et en parallèle d'effectuer un échange de clés qui repose sur une communication quantique réalisée sur des liaisons fibrées ou éventuellement des liens satellitaires [1]. On peut alors combiner les deux clés de telle sorte que casser la clé finale nécessiterait de casser à la fois les deux échanges, post-quantique et quantique, ce qui permet d'avoir une sécurité au moins aussi grande que la plus sûre des deux approches [2].

#### L'hybridation quantique et computationnelle

Étudions maintenant la deuxième approche : l'utilisation de composants typiquement post-quantiques au sein d'un protocole de cryptographie quantique. Une première méthode consiste par exemple à utiliser des fonctions à sens unique, typiques dans les protocoles post-quantiques, dans des protocoles de cryptographie quantique. Cette approche permet alors de réaliser de nouvelles fonctionnalités. Par exemple, avec cette hypothèse seule, il est possible de créer un système de

vote sûr et garantissant l'anonymat de ses électeurs, ce qui n'est pas possible lorsque l'on considère uniquement des fonctions à sens uniques. Les ressources quantiques apportent donc un gain net par rapport à la cryptographie traditionnelle ! Cependant, bien qu'elle permette ces nouvelles fonctionnalités, cette approche ne résout *a priori* pas le problème principal de la cryptographie quantique, à savoir sa praticité.

Un objectif est alors de pouvoir utiliser une hypothèse computationnelle pour augmenter la praticité du protocole, tout en garantissant une sécurité de type *everlasting*, c'est à dire computationnelle durant l'exécution du protocole, mais inconditionnelle au-delà. Une façon d'obtenir une telle sécurité est de supposer qu'un attaquant est limité en temps ou en taille mémoire, dans sa capacité à stocker des états quantiques, ce qui est tout à fait réaliste au vu des technologies actuelles.

Imaginons alors la situation suivante : Alice génère un état quantique de grande dimension  $|\psi\rangle$ , et y encode un bit  $b$ . Elle envoie au préalable à Bob, avec un chiffrement computationnel, les informations sur la mesure permettant de retrouver  $b$ . Dès lors Alice peut envoyer  $|\psi\rangle$  et Bob faire la mesure lui permettant d'obtenir  $b$ . Après un certain temps, un attaquant saura casser le chiffrement computationnel et aura également accès à la mesure. Néanmoins durant ce temps, un attaquant n'a d'autre choix que de stocker l'état quantique  $|\psi\rangle$  en attendant d'avoir cassé le chiffrement. Mais si la capacité

de l'attaquant à stocker de l'information quantique est limitée à des temps beaucoup plus courts que la sécurité computationnelle, ce qui est une hypothèse très bien vérifiée aujourd'hui, alors l'attaquant est dans une situation très défavorable le forçant à mesurer immédiatement l'état quantique de grande dimension sans connaître la mesure adéquate, sachant que le nombre de mesures peut croître très rapidement avec la dimension. Ce modèle, appelé *Quantum Computational Timelock*, permet en outre de réaliser, avec une sécurité *everlasting*, un échange de clé quantique entre Alice et Bob en s'envoyant un grand nombre de copies du même état  $|\psi\rangle$ , ce qui en renforce la praticité par rapport à la cryptographie quantique standard, qui n'est sûre que si une seule copie de l'état quantique est envoyée [3].

### CONCLUSION

Comme récemment illustré par les recommandations de la Commission Européenne [5], combiner les approches quantiques et post-quantiques est une voie d'avenir pour garantir la sécurité des échanges numériques y compris vis à vis d'attaques par un ordinateur quantique. C'est aussi une approche féconde, qui reposera en particulier – tout comme le calcul quantique photonique – sur la capacité à créer et détecter des états quantiques de grande dimension, pour augmenter les performances et la praticité de la cryptographie quantique. ●

## RÉFÉRENCES

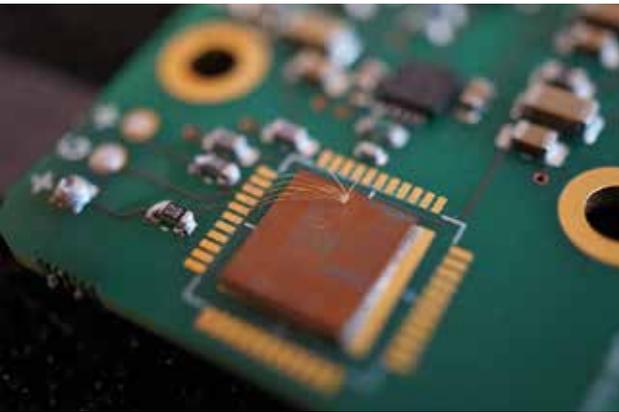
- [1] Y.-A. Chen *et al.*, *Nature* **589**, 214 (2021)
- [2] B. Dowling *et al.*, In *International Conference on Post-Quantum Cryptography* (pp. 483-502). Cham: Springer International Publishing (2020)
- [3] F. Mazzoncini *et al.*, *arXiv:2311.09164* (2023)
- [4] R. Impagliazzo, *Proceedings of Structure in Complexity Theory. Tenth Annual IEEE Conference* (1995)
- [5] European Commission, *Recommendation on a Coordinated Implementation Roadmap for the transition to Post-Quantum Cryptography* (2024)

# COMMUNICATIONS SÉCURISÉES AVEC DES VARIABLES QUANTIQUES CONTINUES

**Yoann PIÉTRI\*, Eleni DIAMANTI**

LIP6 – Sorbonne Université – CNRS, 4 place Jussieu, 75005 Paris

\*yoann.pietri@lip6.fr



**La distribution quantique de clés est une application majeure des technologies quantiques permettant la sécurisation des communications pour des données de haute confidentialité. Son déploiement pratique dans des infrastructures de réseaux nécessite des systèmes de haute performance, compacts et robustes. Dans cet article, sont présentés les concepts de base, les performances et les défis actuels de tels systèmes basés sur le codage de l'information dans des propriétés des quadratures du champ électromagnétique.**

<https://doi.org/10.1051/photon/202513049>

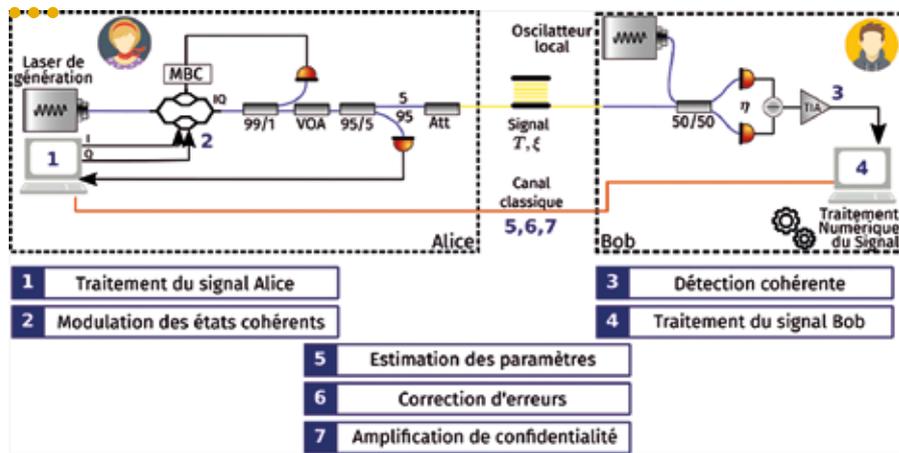
Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation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

**A**u cœur des technologies quantiques se trouve l'utilisation de propriétés intrinsèquement quantiques telles que la superposition, l'intrication ou le principe d'incertitude pour réaliser des tâches avec un avantage par rapport à leur équivalent classique, en termes de puissance de calcul, de sécurité, de précision de mesure... Une application phare de ce domaine est la distribution quantique de clé (QKD, de l'anglais *Quantum Key Distribution*). En effet, cette famille

de protocoles permet à deux utilisateurs de confiance, habituellement nommés Alice et Bob, munis d'un canal de communication quantique public, et d'un canal de communication classique, public mais authentifié, de procéder à l'échange d'une clé (*i.e.* une chaîne de bits) avec une sécurité basée non pas sur des problèmes mathématiques (et donc une sécurité calculatoire) mais sur les lois de la Physique Quantique, en particulier en utilisant le théorème de non-clonage et les relations d'incertitudes [1].

Il existe deux grandes familles de protocoles de QKD : dans la première,

dite à Variables Discrètes (*Discrete Variable Quantum Key Distribution*, DV-QKD), l'information est codée sur des propriétés discrètes de photons uniques telle que la polarisation, alors que dans la deuxième, dite à Variables Continues (*Continuous Variable Quantum Key Distribution*, CV-QKD), l'information est codée sur des propriétés continues, en pratique les valeurs moyennes de quadratures du champ électromagnétique [2]. L'avantage de cette deuxième famille est double : d'une part, le protocole peut utiliser des états cohérents, qui sont relativement simples à ●●●



**Figure 1.** Schéma expérimental et étapes d'un protocole implémenté dans un système CV-QKD moderne [4]. Le traitement numérique du signal joue un rôle primordial pour la stabilité et performance du système. Les étapes de 5 à 7 suivent l'échange des états quantiques et visent l'extraction de la clé secrète finale. Le dispositif expérimental est constitué des composants des télécommunications standards. Le MBC (Contrôleur de Bias du Modulateur) permet d'asservir le modulateur sur son point de fonctionnement. Pour simplifier, le détecteur omet les équipements de calibration et de compensation de la polarisation.

créer avec un laser et à moduler en quadrature avec des dispositifs disponibles commercialement ; de l'autre, la détection de quadratures peut s'effectuer de manière efficace et à température ambiante avec des détecteurs balancés, eux aussi commercialement disponibles. De manière globale, le schéma de communication pour la CV-QKD est comparable à celui des communications cohérentes classiques, ce qui permet d'utiliser un certain nombre de composants et d'outils d'une grande maturité technologique.

**LA DISTRIBUTION QUANTIQUE DE CLÉ À VARIABLES CONTINUES**

La CV-QKD a été proposée pour la première fois en 1999, avec l'encodage de l'information sur l'amplitude et la phase d'états comprimés. En 2002, Grosshans et Grangier proposent un protocole dont l'encodage est basé cette fois sur les quadratures d'états cohérents, bien plus simples à générer [3]. Ces deux protocoles se basent alors sur la mesure d'une unique quadrature, et en 2004, Weedbrook et co-auteurs proposent de mesurer les deux quadratures

pour augmenter l'information partagée. Bien que d'autres propositions aient été faites par la suite, comme par exemple de mesurer les deux quadratures d'états comprimés, d'utiliser des états thermiques ou une communication à deux sens, ou encore des versions indépendantes des systèmes de mesure, nous allons nous concentrer par la suite sur le protocole basé sur les états cohérents et la détection double-quadrature qui

est conceptuellement simple et est utilisé largement dans des systèmes actuels. Un exemple d'un montage expérimental d'un tel système est montré dans la figure 1.

Une intuition du protocole peut être donnée en observant la figure 2.

Alice, sur la gauche, envoie un des quatre états cohérents, représentés par la croix et le bruit quantique intrinsèque sur les quadratures en rouge. L'amplitude  $A$  est reliée au nombre de photons moyens dans les états. Lorsque l'état est transmis à Bob, il y a, d'une part, une perte de photons (les valeurs moyennes se compressent alors vers l'origine, effet non représenté sur la figure) et un bruit en excès se rajoute au bruit quantique (interaction avec l'environnement, attaque par un adversaire, bruit de préparation ou de mesure...). En réalisant un grand nombre de mesures et en comparant ses résultats avec une partie des valeurs d'Alice, Bob peut estimer le facteur de perte du canal et le bruit en excès. Ces derniers peuvent alors être utilisés pour borner l'information récupérée par un espion, en faisant l'hypothèse pessimiste que toutes les pertes et tout le bruit sont dus à cet espion. Il est intuitif de voir que l'amplitude va avoir un effet sur les performances du protocole : si elle est trop élevée,

**Table 1.** Caractéristiques principales de protocoles de distribution quantique de clés à variables discrètes et continues.

	DV-QKD	CV-QKD
Encodage	Qubits (ou qudits) Dimension 2 (ou $n \in \mathbb{N}^*$ )	Quadratures Dimension $\infty$
Détection	Détecteurs de photons uniques Bande passante : 100 MHz - 1GHz Efficacité modérée ou nécessité du refroidissement cryogénique Équipement spécialisé Haut coût énergétique	Détecteurs balancés (photodiodes standards) Bande passante : 1 GHz - 100 GHz Bonne efficacité à température ambiante Équipement télécom standard Faible coût énergétique
Source	Photons uniques ou Impulsion cohérente faible (états leurres)	États cohérents (ou états comprimés)
Résilience aux pertes	Résilience plus importante Record : 421 km	Résilience moins importante Record : 202.81 km
Post-traitement	Post-traitement simple	Post-traitement avancé
Intégrabilité sur puces	Transmetteur : démontré Récepteur : partiellement démontré	Transmetteur : démontré Récepteur : démontré

il est facile pour l'espion de distinguer entre les quatre états de base et de passer inaperçu ; et si elle est trop faible, il n'y aura pas assez d'information partagée entre Alice et Bob.

En pratique Alice peut moduler les valeurs moyennes des quadratures selon plusieurs manières, généralement appelés les modulations. Historiquement, la modulation de choix est la modulation Gaussienne où les valeurs moyennes des deux quadratures sont choisies selon une distribution Gaussienne. Néanmoins, inspirées des communications classiques, des modulations discrètes sont aussi considérées telles que les *Phase Shift Keying* (PSK, modulation par changement de phase), les *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM, modulation d'amplitude en quadrature) ou encore des QAM avec mise en forme probabiliste (*Probabilistic Constellation Shaping*, PCS). D'une part, ces modulations sont les seules qui peuvent être effectivement réalisées avec des systèmes digitaux, mais, considérant que des PCS-QAM à haute densité sont très proches d'une modulation Gaussienne, des bons débits avec des modulations à faible densité permettrait aussi d'utiliser des équipements moins exigeants en termes de performances et de simplifier la correction d'erreurs. Le défi de ces modulations réside néanmoins dans les preuves de sécurité, qui sont encore un sujet actif de recherche. Le taux de génération de clé secrète dépend de plusieurs paramètres du système, en particulier de la variance de modulation d'Alice (reliée au nombre moyen de photons par symbole), de la transmittance du canal quantique, du bruit en excès, et de l'efficacité quantique et du bruit électronique du détecteur. Il dépend également de la modulation utilisée et du fait de considérer un nombre infini de symboles (dit cas asymptotique) ou, dans un cas plus réaliste, un nombre fini de symboles, ce qui nécessite l'application des termes correctifs [5].

### TRAITEMENT NUMÉRIQUE DU SIGNAL POUR LA CV-QKD À HAUT DÉBIT

Depuis 2015, de nombreux efforts en CV-QKD ont eu pour objectif de transférer la complexité des systèmes de la partie optique vers des algorithmes de post-traitement. Le post-traitement, inspiré des méthodes des télécommunications classiques, permet d'augmenter le taux de répétition, réduire les interférences inter-symboles, et corriger une partie des erreurs physiques.

Une des techniques standard est maintenant d'utiliser un laser à onde continue (*Continuous Wave*, CW) et d'appliquer une mise en forme d'impulsions basée sur des filtres respectant le critère de Nyquist, et permet, en théorie, d'éliminer les interférences entre symboles. Un filtre de choix est le filtre cosinus surélevé (*Raised Cosine*, RC) ; en pratique, la plupart des systèmes implémentent ce filtre en utilisant un filtre racine de cosinus surélevé (*Root Raised Cosine*, RRC) en émission et un filtre adapté (le même) en réception.

Du fait de la séparation des lasers de génération du signal et pour l'oscillateur local, comme montré dans la figure 1, des différences de fréquence et de phase existeront, et devront être corrigées. Des erreurs d'horloge peuvent aussi exister. Ces différentes notions sont regroupées sous le terme de synchronisation (en temps, en fréquence et en phase) et représentent un défi pour augmenter

les taux de répétition et distances atteignables en CV-QKD. La méthode principalement adoptée aujourd'hui est d'utiliser des références classiques, appelées pilotes, multiplexées en fréquence ou en temps. Le défi majeur émerge alors d'un compromis : un bon rapport signal-à-bruit sur ces pilotes en réception permettra une bonne synchronisation mais requiert une bonne isolation de ces références par rapport au signal quantique, au risque sinon d'augmenter le bruit en excès. Des optimisations doivent alors être réalisées pour obtenir le meilleur débit de clé secrète. Les étapes du traitement numérique du signal nécessaires sont résumées dans la figure 3.

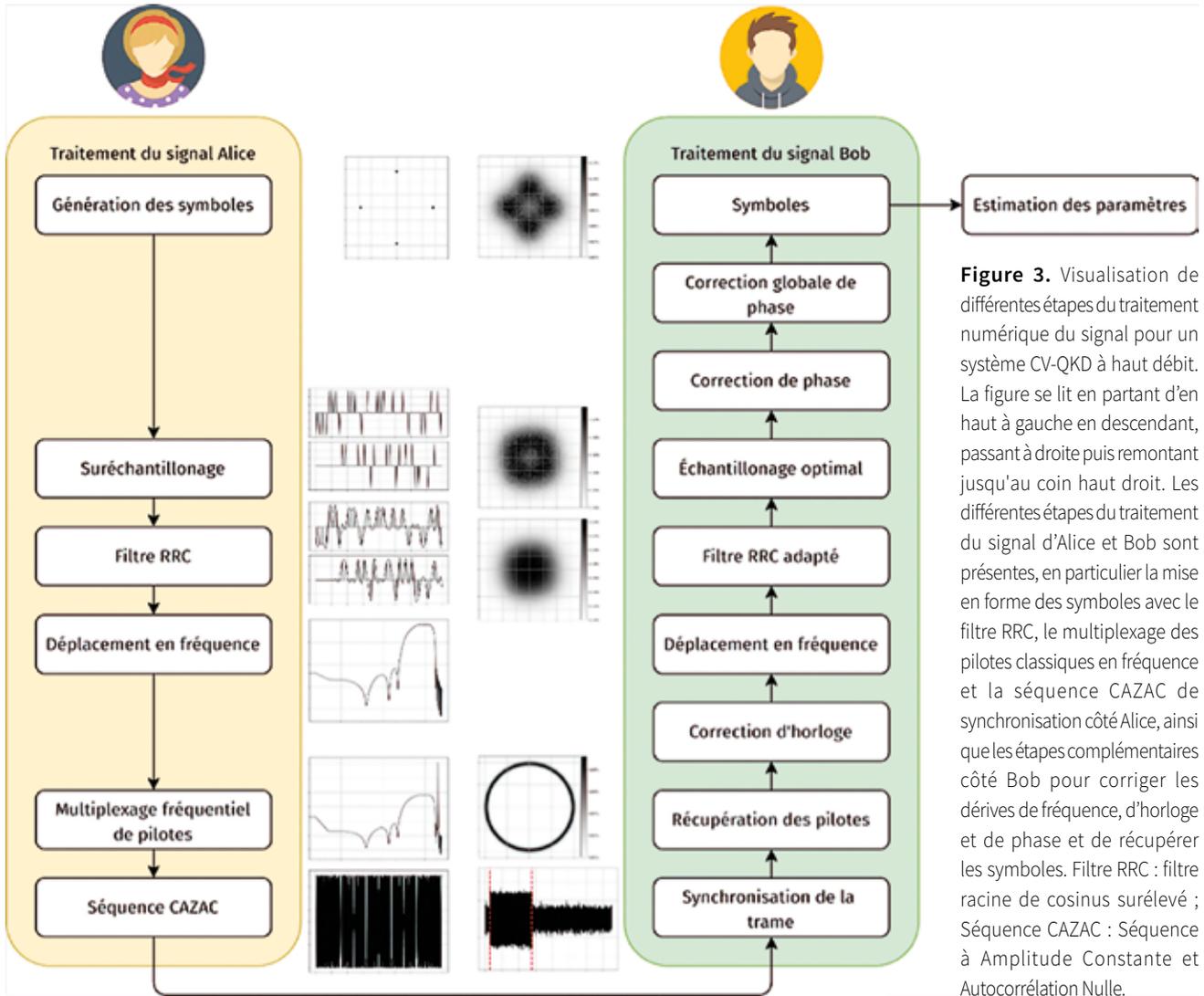
### DÉFIS DE LA DISTRIBUTION QUANTIQUE DE CLÉS À VARIABLES CONTINUES

Malgré de larges avancées ces dernières années, le domaine de la QKD ne reste pas sans défis. Ces défis industriels, technologiques et scientifiques sont des sujets de recherche éminents à l'heure actuelle et nous soulignons les plus importants ci-dessous.

**Augmentation du débit de clé secrète et temps réel :** pour atteindre un échange de message avec une sécurité inconditionnelle, il est nécessaire que la taille de la clé soit au moins supérieure à celle de la taille du message, impliquant ainsi que le débit de la génération de clé soit supérieur à celui du débit de ●●●

Figure 2. Idée conceptuelle d'un protocole de QKD à variables continues où Alice et Bob utilisent une constellation de quatre états cohérents.





**Figure 3.** Visualisation de différentes étapes du traitement numérique du signal pour un système CV-QKD à haut débit. La figure se lit en partant d'en haut à gauche en descendant, passant à droite puis remontant jusqu'au coin haut droit. Les différentes étapes du traitement du signal d'Alice et Bob sont présentes, en particulier la mise en forme des symboles avec le filtre RRC, le multiplexage des pilotes classiques en fréquence et la séquence CAZAC de synchronisation côté Alice, ainsi que les étapes complémentaires côté Bob pour corriger les dérives de fréquence, d'horloge et de phase et de récupérer les symboles. Filtre RRC : filtre racine de cosinus surélevé ; Séquence CAZAC : Séquence à Amplitude Constante et Autocorrélation Nulle.

communication. L'augmentation de ce débit peut passer par plusieurs efforts (réduction des pertes et/ou du bruit, amélioration des preuves de sécurité, ...) mais passe aussi par l'utilisation même des protocoles à variables continues, qui permettent d'augmenter le taux de répétition de la source et de la détection au-dessus du Gigahertz voire des dizaines de Gigahertz. De plus, les systèmes doivent atteindre des fonctionnements en temps réel, et éliminer les goulots d'étranglement dans le post-traitement.

**Augmentation de la distance :** l'information quantique ne pouvant pas être copiée, les communications quantiques sont limitées, en pratique, par les pertes induites par les canaux de communication, qui sont

exponentielles avec la distance dans les fibres optiques. Dans le cas de la CV-QKD, un facteur limitant la distance est le bruit de phase entre les deux lasers utilisés dans le système. En effet, malgré l'envoi de pilotes pour corriger cette différence, il existe toujours une erreur résiduelle, qui croît lorsque le rapport signal-à-bruit de pilotes décroît. À grande distance, il devrait être possible de corriger cet effet en augmentant la puissance des pilotes émis, mais cela résulte en une augmentation du bruit induit par le pilote sur les données quantiques. Ainsi, un des axes de recherche actuels réside en l'amélioration de l'isolation entre les données quantiques et les pilotes, et l'amélioration des algorithmes de récupération de la phase. Un autre domaine très actif

est celui des communications satellitaires. En effet, les pertes y sont moins importantes (à distances égales), ce qui permet d'atteindre des distances plus importantes. Néanmoins, ces communications apportent de nouveaux défis, en particulier à cause des turbulences qui modifient le mode spatial (et peuvent donc limiter les efficacités de couplage) mais aussi à cause des paramètres du canal (transmittance et bruit en excès) qui sont variables et qui nécessitent donc des techniques spécialisées [6].

**Réduction de la taille et coût des systèmes :** une étape importante pour une adoption potentiellement plus large est la miniaturisation des systèmes avec des processus fiables. L'utilisation de composants de photonique intégrée a aujourd'hui ●●●



L'horizon de la QKD s'étend

Plus vite et plus loin : valorisez votre QKD  
avec la performance des SNSPDs.

Clavis XGR QKD



ID281 Pro SNSPD



un grand potentiel pour les technologies de communication quantique. La CV-QKD est, de plus, un bon candidat pour l'intégration photonique, dans la mesure où les composants nécessaires sont les mêmes que pour les communications classiques et bénéficie donc des années de recherche dans le domaine. A contrario, les systèmes DV-QKD se révèlent plus difficiles à intégrer, notamment à cause des détecteurs de photons uniques, qui doivent de surcroît être refroidis pour opérer à de bonnes efficacités à des longueurs d'ondes telecoms. Récemment, plusieurs démonstrations de systèmes intégrés pour la CV-QKD ont été démontrés à des distances de l'ordre de la dizaine à la centaine de kilomètres, principalement en utilisant des technologies compatibles avec le process CMOS (Photonique sur Silicium) [7], voir figure en début de l'article. Un défi important réside néanmoins dans l'intégration des sources lasers, qui ne sont pas possibles sur Silicium à des longueurs d'ondes telecoms et requièrent donc d'autres plateformes ou de l'hybridation.

**Déploiement des systèmes compatibles avec les communications classiques :** pour pouvoir être viable, les systèmes de communication quantique doivent être déployés sur des réseaux de télécommunications et l'opération de ces systèmes doit être démontrée en parallèle d'infrastructures classiques. En effet le déploiement d'une nouvelle infrastructure parallèle spécifique pour la communication quantique ne permet pas le passage à l'échelle et semble peu probable sur le long terme. Dans l'Union Européenne, cet effort prend la forme du projet EuroQCI qui a pour vocation l'établissement et l'utilisation d'un réseau de communication quantique européen. En France, des réseaux sont déployés en région Parisienne et dans la région Niçoise. Le réseau de la région Parisienne est composé de 8 nœuds reliés par 14 fibres dédiées aux applications quantiques (mais issues du réseau telecom classique). Deux systèmes CV-QKD ont été

déployés sur le réseau, dont un reliant deux laboratoires académiques sur un lien de 14.64 km et avec un débit de clé secrète asymptotique de 0.85 Megabit/s. Des efforts similaires sont aussi présents dans de nombreux autres pays de l'Union Européenne et dans le monde.

**Certification et standardisation des systèmes :** la certification et la standardisation de systèmes est un effort indispensable pour une adoption en dehors du monde académique. En ce qui concerne la standardisation, plusieurs organismes de normalisation ont commencé à publier des normes, et un exemple particulier est l'institut européen des normes de télécommunications (ETSI) qui a un comité dédié à la QKD. La certification est, en Europe, adressée par un projet ambitieux, qui a pour vocation la création d'une autorité de certification de systèmes QKD européenne. Le défi est alors d'identifier les différentes attaques par canaux cachés, valider les potentielles contre-mesures et de prévoir des tests pour savoir si un système QKD est sujet à une attaque particulière.

**Preuves de sécurité :** pour atteindre une sécurité inconditionnelle, les systèmes de QKD doivent reposer sur des preuves robustes et correspondant aux implémentations pratiques. Ces preuves doivent aussi être valides en considérant un nombre fini d'états échangés et pas seulement dans la limite asymptotique (effets de taille finie). En ce qui

concerne la CV-QKD, les preuves sont complètes dans le cas où la modulation est Gaussienne (que ce soit dans le cas asymptotique ou avec effets de taille finie). Lorsque des modulations discrètes sont utilisées, il existe une preuve générale dans le cas asymptotique, mais le cas fini est encore source de nombreuses recherches. Il faut s'assurer de plus que ces preuves soient composables, c'est dire que le protocole de QKD peut être composé avec un autre protocole sans compromettre la sécurité. Enfin, l'hybridation avec des protocoles de cryptographie post-quantique sera nécessaire pour l'intégration dans des systèmes modernes permettant une sécurité en profondeur.

## CONCLUSION

La cryptographie quantique, et en particulier la distribution quantique de clés, est rentrée ces dernières années dans une phase de maturation technologique qui fait avancer l'ingénierie des systèmes et leurs performances de façon significative, ouvrant la voie à leur utilisation pour des cas d'usage réels à court terme. Les protocoles à variables continues sont particulièrement bien adaptés à des réseaux métropolitains et à des configurations qui requièrent des débits élevés et des conditions d'utilisation contraignantes. Adresser les défis du domaine permettra l'adoption de cette technologie pour des communications sécurisées dans des infrastructures de grande envergure. ●

## RÉFÉRENCES

- [1] V. Scarani *et al.*, *Rev. Mod. Phys.* **81**, 1301 (2009).
- [2] E. Diamanti, A. Leverrier, *Entropy* **17**, 6072 (2015).
- [3] F. Grosshans *et al.*, *Nature* **238**, 421 (2003).
- [4] Y. Piétri *et al.*, *Quantum* **8**, 1575 (2024).
- [5] F. Roumestan *et al.*, *Journal of Lightwave Technology* **42**, 5182 (2024).
- [6] V. Marulanda-Acosta *et al.*, *New J. Phys.* **26**, 023039 (2024).
- [7] Y. Piétri *et al.*, *Optica Quantum* **2**, 428 (2024).

# COMPRENDRE

## LA DISTRIBUTION QUANTIQUE DE CLÉ POUR DES COMMUNICATIONS SÛRES

**Corentin LANORE\*** et Jean-Daniel BANCAL

Université Paris Saclay, CEA, CNRS, Institut de physique théorique, 91191 Gif-sur-Yvette, France

\*corentin.lanore@ipht.fr



**La distribution quantique de clé tire profit des lois de la physique quantique pour étendre une clé secrète entre deux utilisateurs distants. Cela leur permet de communiquer avec la garantie qu’aucun acteur extérieur n’est en mesure de déchiffrer leurs échanges. Après quarante ans de développements théoriques et expérimentaux, la sécurité pratique de cette technologie quantique est maintenant à portée de main.**

<https://doi.org/10.1051/photon/2025313055>

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

**L**a vie privée est un aspect important de notre société. Lorsque l’on discute entre amis ou en famille, par exemple, on sait à qui on s’adresse. *Cet a priori* est remis en question avec l’essor de la communication en ligne où nos échanges peuvent traverser la planète avant d’atteindre leurs destinataires.

La communication sur un réseau public présente des risques lorsque les informations transmises sont sensibles. Or, il est commun de transmettre des données médicales

à destination d’un médecin sur internet, ou bien les requêtes bancaires d’un site marchand permettant de valider un achat. On imagine aisément les conséquences que pourraient avoir ces communications si elles n’étaient pas systématiquement chiffrées. En offrant des garanties d’intégrité et de sécurité pour nos informations transmises électroniquement, la cryptographie – science du chiffrement – tient un rôle important dans notre société connectée.

En effet, les protocoles cryptographiques permettent d’accomplir certaines tâches avec des garanties de sécurité établies au moyen de

preuves mathématiques. Comme toute démonstration, ces preuves reposent sur des hypothèses. Le contexte de la communication à distance impose un ensemble d’hypothèses minimales dites “classiques” (*c.f.* Encart 1). Cependant, les protocoles de chiffrement actuels ne permettent pas d’obtenir une sécurité dans ce cadre simple et font appel à des hypothèses supplémentaires, comme l’hypothèse dite de “complexité”, qui réduisent le niveau de sécurité.

L’idée sous-jacente à l’hypothèse de complexité est que si le déchiffrement d’un message est en ●●●

principe possible mais requiert un effort de calcul qu'un supercalculateur actuel ne peut atteindre en un temps raisonnable, alors la garantie de sécurité est effective. Un problème complexe souvent utilisé à cet effet est le problème de la factorisation, pour lequel aucun algorithme classique efficace n'a été trouvé depuis l'antiquité. L'essentiel des protocoles cryptographiques actuels, y compris

RSA, Diffie-Hellman ou même les courbes elliptiques reposent sur ce principe.

Cependant, cette sécurité est aujourd'hui mise à mal. On sait en effet que l'ordinateur quantique couplé à l'algorithme de Shor promet à terme le décryptage des messages basés sur cette hypothèse de complexité en un temps raisonnable. Les défis technologiques à surmonter pour

réaliser un tel déchiffrement sont encore importants, ce qui laisse le temps de préparer une réponse. Concrètement, deux pistes sont envisagées :

1. Élaborer de nouveaux protocoles classiques qui prennent en compte les capacités d'un ordinateur quantique. Il s'agit de la cryptographie post-quantique.
2. Élaborer des protocoles fondamentalement nouveaux qui tirent profit des lois de la physique quantique, c'est ce que propose la distribution quantique de clé.

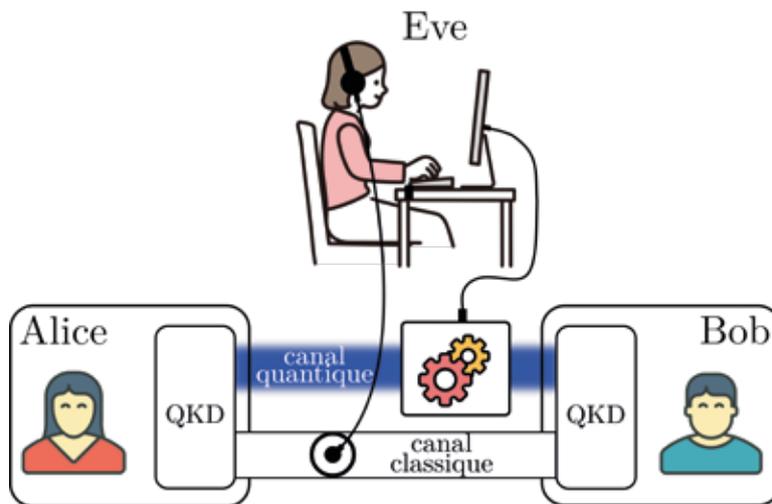
Ces deux approches ont chacune des avantages et des inconvénients qui leur sont propres. D'un côté, la cryptographie post-quantique est a priori facile à mettre en œuvre car elle se résume à la mise à jour des algorithmes de chiffrement existants vers de nouvelles normes en cours de définition. Cependant, sa sécurité est intrinsèquement limitée, car sa démonstration reviendrait à résoudre des problèmes considérés comme extrêmement difficiles, du type  $P=NP$ . En l'absence de preuve de sécurité complète, on ne peut qu'espérer que les protocoles choisis tiennent le coup.

De l'autre côté, la solution quantique est plus difficile à mettre en œuvre : elle requiert des équipements dédiés et un certain nombre de défis technologiques doivent encore être relevés avant qu'elle ne puisse être plus largement adoptée. Cependant, la théorie quantique offre ce que les protocoles classiques ne parviennent pas à atteindre: une sécurité forte, prouvée sans condition supplémentaire que les hypothèses cryptographiques classiques. En voici le principe.

**DISTRIBUTION QUANTIQUE DE CLÉ DÉPENDANTE DES DISPOSITIFS**

Le chiffrement quantique s'appuie sur un protocole classique simple, appelé le "masque jetable". Cette

**LE SCÉNARIO CRYPTOGRAPHIQUE**



**Figure 1.** Distribution quantique de clé en présence d'un adversaire. Remerciements : pixelbazaar (Alice et Bob), soco-st (Eve), SVG Repo (Engrenage)

Deux utilisateurs distants, communément appelés Alice et Bob, souhaitent communiquer de façon secrète. Ils se font confiance, mais leur canal de communication est accessible à un adversaire, Eve, qui désire écouter leur conversation.

Eve est cependant limitée dans ses actions. Par exemple, elle n'a pas accès aux laboratoires d'Alice et de Bob, sinon elle pourrait directement lire le message secret sur leur écran. De plus, on peut supposer que leurs opérations classiques se déroulent comme prévu, car elles peuvent être vérifiées par la suite si nécessaire. Finalement, comme le message est inconnu de l'adversaire, cela veut dire qu'Alice et Bob sont en mesure de générer des nombres dont Eve n'a pas connaissance. Ces conditions définissent les hypothèses cryptographiques classiques sous lesquelles on souhaite garantir la sécurité.

Notons qu'il est inutile pour Eve d'interrompre la communication entre Alice et Bob ou de modifier le contenu de leurs messages classiques, sinon ils se rendraient compte de sa présence et arrêteraient de communiquer. En revanche, Eve peut perturber les systèmes quantiques échangés sans se faire remarquer.

méthode permet à deux personnes de communiquer de façon confidentielle du moment qu'elles partagent une clé secrète suffisamment longue. Le problème se réduit ainsi à l'extension d'une clé secrète à distance (Encart 2). Or cette étape n'est pas réalisable avec des moyens classiques et nécessite donc une description quantique.

Le premier protocole de distribution quantique de clé, dont la sécurité ne dépend pas d'une hypothèse de complexité, a été proposé en 1984 par Charles Bennett et Gilles Brassard (BB84). Il peut être compris dans un scénario basé sur l'intrication, et porte alors le nom de BBM92 [1]. Dans ce protocole, des états intriqués sont distribués à Alice et Bob, sous la forme de photons intriqués en polarisation par exemple, et sont mesurés localement dans des directions choisies (voir Figure 3).

Notons que d'autres formes d'intrication, comme en énergie-temps, peuvent également être utilisées. Différents degrés de liberté quantiques ont par ailleurs inspiré une variété de protocoles de distribution quantique de clé. On peut mentionner les protocoles à variables continues inspirés des champs optiques continus, ainsi que les protocoles à référence de phase distribuée inspirés par les impulsions laser faibles.

Un état maximalelement intriqué a la propriété que lorsque ses deux particules sont mesurées dans la même direction, les résultats obtenus sont à la fois identiques pour les deux particules et aléatoires, c'est à dire imprédictibles pour toute tierce personne. C'est exactement ce qu'on attend d'une clé secrète partagée : qu'elle soit partagée entre Alice et Bob, et aléatoire. Ainsi, si les utilisateurs sont en mesure de se convaincre qu'ils partagent bien un état maximalelement intriqué, ils peuvent être certains que leurs résultats forment une clé secrète.

Après avoir mesuré tous leurs photons, Alice et Bob annoncent leurs choix de mesures respectifs et révèlent une partie de leurs résultats. En fonction de ces informations, et en connaissant les mesures effectuées, ils en déduisent si les états distribués ont été suffisamment intriqués pour former une clé. Ils appliquent alors un ensemble de traitements classiques à leurs données afin d'extraire la clé finale.

Si tout se passe bien, la sécurité de la clé obtenue ainsi peut être formellement prouvée. Cependant, l'histoire a montré que ce n'est pas parce qu'un protocole est théoriquement sûr que son implémentation expérimentale l'est également. Pour que la sécurité tienne en pratique, il faut que le modèle utilisé dans l'analyse de sécurité corresponde exactement à l'implémentation physique.

### ATTAQUES ET AMÉLIORATIONS

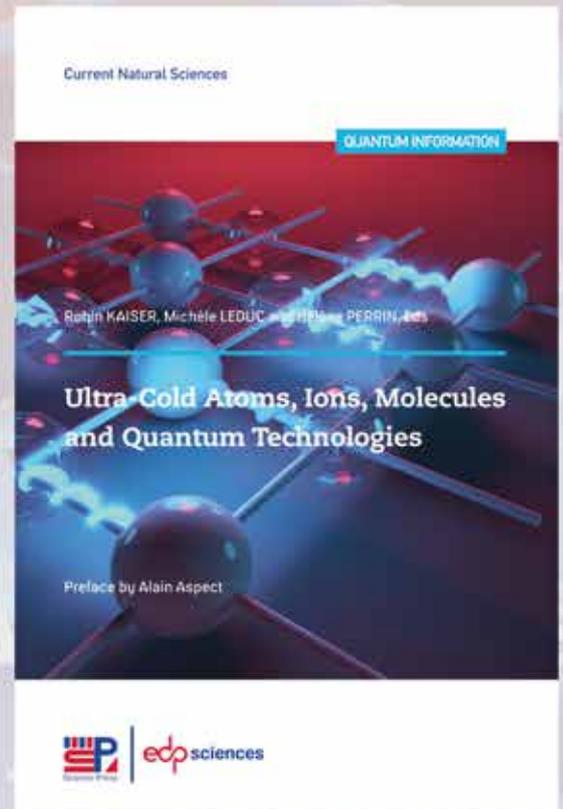
En effet, plusieurs attaques ont mis en évidence l'impact que peut avoir un décalage entre la modélisation physique des systèmes quantiques et leur comportement réel [2]. "L'attaque par aveuglement" en est un exemple, qui ouvre une faille de sécurité en faisant fonctionner les détecteurs d'Alice et Bob dans un régime différent de celui pour lequel ils ont été prévus [3].

Une réponse efficace à cette attaque a été apportée par les protocoles dits "indépendants des dispositifs de mesure". ●●●

# Ultra-cold Atoms, Ions, Molecules and Quantum Technologies

By  
**Robin Kaiser,  
Michèle Leduc,  
Hélène Perrin**

Preface By  
**Alain  
Aspect**



The field of cold atoms was born forty years ago and today remains a theme regularly awarded Nobel Prizes and at the forefront of physics research. This book presents the most recent developments and traces the exceptional growth of this field over the last years.

Also available in e-book format

For sale on  
[laboutique.edpsciences.fr](http://laboutique.edpsciences.fr)

ISBN : 978-2-7598-2745-9  
168 illustrated pages  
Price : 95 €



Prix Roberval



### LE MASQUE JETABLE

Nombre de méthodes de chiffrement ont été inventées à travers les siècles sans être nécessairement sûres. Il en existe cependant dont la sécurité est prouvée mathématiquement, c'est le cas du "masque jetable". Cette méthode repose sur une clé secrète initialement partagée entre Alice et Bob. Pour communiquer secrètement le message binaire "011001" au moyen du masque jetable, Alice encode son message en effectuant l'addition binaire (modulo 2) entre chaque chiffre du message et de la clé partagée "111011". Elle envoie ensuite le résultat "100010" dans un canal public (internet par exemple) à Bob. Il lui suffit alors de faire l'addition binaire avec sa clé (identique à celle d'Alice) pour retrouver le message initial. Cette méthode est sûre, car le message envoyé sur le canal public est totalement aléatoire pour quelqu'un qui n'a pas accès à la clé de chiffrement. Cependant, la clé doit être aussi longue que le message envoyé et elle ne peut être réutilisée pour envoyer un second message. Dans une communication continue, il faut donc être capable d'allonger une clé secrète de sorte à compenser la longueur de clé qui est consommée lors de chaque étape de communication. La distribution quantique de clé résout ce problème en permettant d'étendre une clé secrète à volonté.

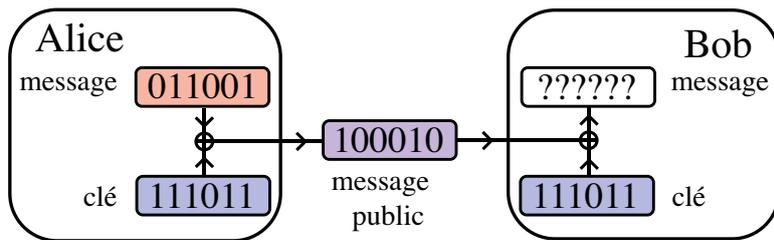


Figure 2. Illustration de l'utilisation du masque jetable

L'idée est de ne pas faire confiance à la caractérisation des détecteurs lors de la preuve de sécurité. Ainsi, la sécurité obtenue ne dépend pas de l'adéquation entre le fonctionnement réel des détecteurs et leur comportement attendu, et reste valide si les détecteurs sont aveuglés.

Mais l'idée de se protéger des attaques en réduisant la confiance sur les appareils quantiques peut être poussée plus loin. En effet, comme les mesures, les sources quantiques peuvent également se comporter différemment de ce qui est attendu d'elles, ouvrant la porte à un nouveau décalage entre théorie et expérience.

La distribution de clé indépendante des dispositifs quantiques remplit cette mission en ne reposant sa sécurité sur la caractérisation d'aucun

appareil quantique (Encart 4). Suite à une première proposition dans cette direction en 1991 par Artur Ekert [4], une preuve théorique complète a été

obtenue en 2014 [5] et une première réalisation expérimentale en 2022 [6].

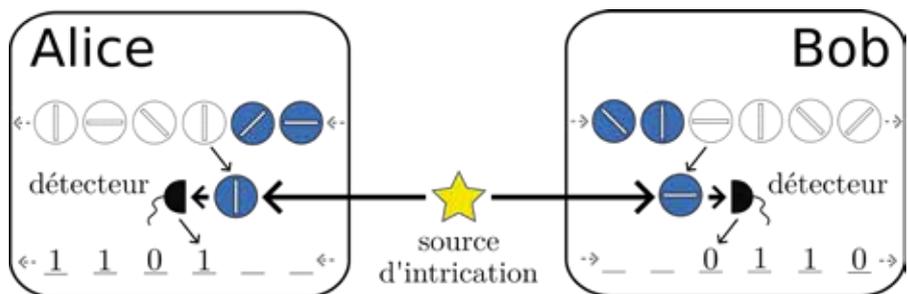
La réalisation de ce protocole reposant sur une modélisation quantique simplifiée ouvre la voie à un niveau de sécurité sans précédent dans l'histoire des communications à distance. En effet, il permet finalement de garantir la sécurité des communications uniquement au moyen des hypothèses cryptographiques classiques. La sécurité obtenue est ainsi pratique et non plus seulement théorique.

### CONCLUSION

La distribution quantique de clé fournit un moyen de communiquer sûr, dont la sécurité ne repose pas sur une hypothèse de "complexité" qui pourrait être mise à mal à tout moment. Longtemps limitée par le décalage entre description théorique et réalité expérimentale, la distribution quantique de clé a maintenant atteint une sécurité pratique, qui fait entièrement abstraction des détails quantiques. Son implémentation est exigeante mais reste sensiblement plus accessible que d'autres technologies quantiques en développement comme le calcul quantique universel par exemple.

Les défis à relever pour rendre cette sécurité accessible à tous sont encore multiples. En particulier, une amélioration des capacités à produire des états intriqués à la fois

Figure 3. Exemple d'installation de distribution quantique de clé basée sur l'intrication. Des états maximales intriqués  $|\phi^+\rangle = (|\uparrow\uparrow\rangle + |\downarrow\downarrow\rangle)/\sqrt{2}$  (ici en polarisation) sont partagés. Pour chaque état reçu, Alice et Bob font des choix de mesure, représentés par les filtres de polarisation, et notent si leur détecteur clique ou pas. Ces résultats de mesure permettent de vérifier la qualité de la source et forment la clé brute.



## LA DISTRIBUTION DE CLÉ INDÉPENDANTE DES DISPOSITIFS QUANTIQUES EMPLOYÉS

Afin de protéger la cryptographie quantique des attaques sur l'implémentation physique (interférences extérieures sur les sources ou sur les détecteurs), il est nécessaire de faire abstraction des dispositifs employés. Cela revient à considérer les appareils comme des "boîtes noires", dont on ne connaît pas initialement les détails. Leur description doit alors être déduite des interactions classiques effectuées avec ces appareils : les choix et les résultats des mesures.

Dans ce contexte, la sécurité se montre en effectuant un test de Bell. En effet, la violation d'une inégalité de Bell implique que l'état distribué est intriqué, et garantit l'imprédictibilité des résultats de mesure. Effectuer un test de Bell est exigeant expérimentalement, mais les avancées expérimentales ont récemment permis la première extension de clé indépendante des dispositifs quantiques [6].

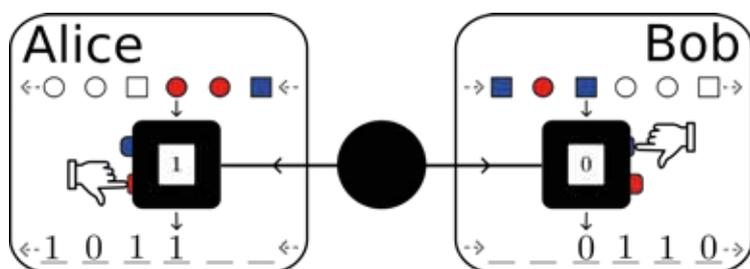


Figure 4. Illustration de la distribution de clé indépendante des dispositifs quantiques.

de bonne qualité et à longue distance est capitale. Cet effort passe par des avancées sur les briques élémentaires comme les sources de photons, ainsi que par le développement des répéteurs et des réseaux quantiques. Le taux de clé actuellement disponible sur les systèmes de cryptographie quantique commerciaux reste encore bien en deçà des débits de la plupart des communications

et demande donc aussi à être augmenté. De plus, une réduction de la taille des implémentations expérimentales, par exemple au moyen de circuits intégrés optiques, permettrait de favoriser une adoption de la cryptographie quantique à grande échelle. À terme, ces efforts permettront à la fois d'atteindre une sécurité optimale et de démocratiser l'accès à cette technologie. ●

## RÉFÉRENCES

- [1] C. H. Bennett, G. Brassard, N. D. Mermin, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 557 (1992)
- [2] D. Rusca, N. Gisin, *arXiv:2411.04044*
- [3] L. Lydersen *et al.*, *Nature Photonics* **4**, 686 (2010)
- [4] A. K. Ekert, *Phys. Rev. Lett.* **67**, 661 (1991)
- [5] U. Vazirani, T. Vidick, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 140501 (2014)
- [6] D. Nadlinger *et al.*, *Nature* **607**, 682 (2022)



**CIAO**

**IMPROVE  
YOUR  
TELESCOPE  
RESOLUTION**

**Adaptive Optics  
solution**

**VIS-NIR / SWIR**

**Astronomy, SSA**

**FSO, SatCom &  
Quantum com.**



[www.imagine-optic.com](http://www.imagine-optic.com)

[sales@imagine-optic.com](mailto:sales@imagine-optic.com)  
+33 1 64 86 15 60

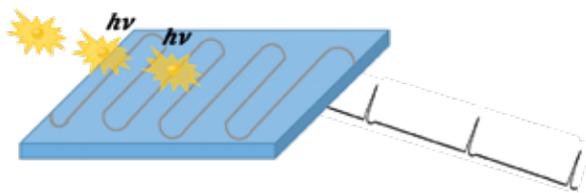
**imagine optic**

# DÉTECTEUR DE PHOTONS SUPRACONDUCTEUR

**Christophe COUTEAU\***

Laboratoire Lumière, nanomatériaux & nanotechnologies-L2n, Université de Technologie de Troyes-UTT & CNRS UMR7076, Troyes, France  
Département de Physique, Université d'Oxford, Oxford, Royaume-Uni

\*christophe.couteau@utt.fr



<https://doi.org/10.1051/photon/202513060>

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 mesure d'un photon unique correspond à la mesure d'un flux de lumière inférieur au  $fW$  soit plus de 12 ordres de grandeur par rapport à l'émission typique d'un pointeur laser de l'ordre du  $mW$ . Sans surprise, les détecteurs 'standards' de lumière ne sont pas en capacité de détecter ce niveau de signal qui sera perdu dans le bruit intrinsèque de tout détecteur de lumière tel qu'une photodiode en silicium ou une thermopile. Il est donc nécessaire de développer des capteurs spécifiques et optimisés pour la détection de très faible niveau de lumière jusqu'à la limite ultime du photon unique (limite ultime dans le sens où un photon est insécable). Nous allons aborder dans cet article un type spécifique de détecteurs à

**Un photon est la limite ultime mesurable de la lumière et demande par conséquent des détecteurs spécifiques à photons uniques. L'optique quantique et la photonique quantique sont des sous-domaines spécifiques de la physique qui nécessitent la création, la manipulation et la détection de photons uniques. Nous allons aborder plus spécifiquement la partie détection de photons uniques à base de technologies supraconductrices, et verrons quels sont les paramètres importants et quelles sont les applications qui en découlent.**

photons uniques basé sur des technologies nécessitant des matériaux supraconducteurs où nous commencerons par donner le principe de fonctionnement, les paramètres pertinents pour un tel capteur puis nous aborderons les champs d'applications avant de conclure.

## PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

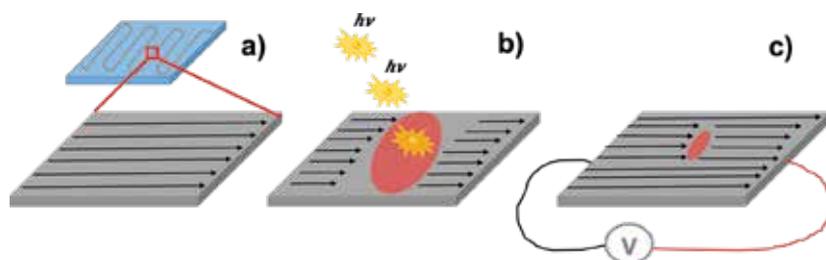
Il existe différents types de technologies de détecteurs à photons uniques notamment à base de matériaux semi-conducteurs tels que des photodiodes à avalanches mais encore les photomultiplicateurs basés sur l'effet photoélectrique. Dans tous les cas, ce transducteur/capteur/détecteur est un appareil de mesure qui va transformer un signal optique (jusqu'au minimum détectable, le photon) en signal électrique qui sera enfin lu et

analysé par un circuit électronique doté d'une interface informatique. Historiquement, les besoins en détection de faibles signaux de lumière étaient en astronomie et notamment dans les domaines proche et moyen infra-rouge. Les détecteurs à base de matériaux supraconducteurs ont alors été développés à base de jonction tunnel supraconductrice ou encore les capteurs à transition de bord (transition edge sensor ou TES en anglais). En 2001, une nouvelle génération de détecteurs de lumière est apparue à base de matériaux supraconducteurs [1]. Le principe de fonctionnement est l'apparition d'un 'point chaud', mesurable électriquement, lorsqu'un photon unique est absorbé par le matériau. Ce détecteur sur lequel se focalise cet article est appelé un détecteur à photon unique à base de nanofil supraconducteur

(Superconducting Nanowire Single-Photon Detector ou SNSPD en anglais) [2,3]. La Figure 1 présente le principe de fonctionnement de base qui s'appuie sur la supraconductivité qui est un phénomène physique qui se manifeste lorsqu'un matériau conduit l'électricité sans quasiment aucune résistance électrique. La supraconductivité apparaît dans ce type de matériau lorsqu'il est refroidi à de très basses températures (en-dessous de la température critique d'apparition de l'effet supraconducteur). Il est à noter à ce stade que l'un des intérêts majeurs de ce type de détecteur par rapport aux autres capteurs à base de supraconductivité est que les températures cryogéniques nécessaires sont de l'ordre de quelques kelvins et non pas des sub-kelvins qui nécessitent alors de la cryogénie plus complexe et notamment un cryostat à dilution. Ce matériau (typiquement à base de nitrure de niobium NbN ou d'un composé à base de NbN) va voir les électrons de conduction qui le constituent en l'état normal, non-supraconducteur, former des paires d'électrons appelées des "paires de Cooper", qui se déplacent sans résistance ou collisions dans le matériau, donc produisant des courants sans l'effet de résistance ohmique. En revanche, ces paires de Cooper peuvent être 'cassées' par absorption de la lumière et c'est là que cet effet physique peut être utilisé

pour la détection. Dans la plupart des géométries, un SNSPD utilise un nanofilament (voir Figure 1-a) généralement de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres de diamètre et de plusieurs micromètres de long sous forme de méandres pour maximiser la probabilité d'interaction et donc d'absorption avec un photon incident (la question de la 'localisation' spatiale de la lumière et donc d'un photon unique reste un questionnement profond en physique en général). Cette géométrie permet d'augmenter la densité de courant dans le matériau. Lorsqu'un photon arrive sur le nanofilament supraconducteur, il peut être alors absorbé et il va modifier l'état du matériau, provoquant une perturbation locale de l'état supraconducteur. Cette perturbation crée ce qui est appelée une quasi-particule (à savoir un électron ou un trou, sachant que les paires de Cooper sur les 'vraies' particules dans l'état supraconducteur où la norme devient ces paires de Cooper et non des charges libres comme les électrons ou les trous habituellement trouvés dans les matériaux qui ne sont pas dans un état supraconducteur) qui va venir perturber la supraconductivité. Si l'énergie du photon incident est suffisamment grande, localement le matériau peut passer de l'état supraconducteur à l'état normal (non supraconducteur), entraînant une résistance locale (voir ●●●

**Figure 1.** Principe de fonctionnement d'un détecteur SNSPD. Fig. 1-a : courant supraconducteur sans résistance, Fig 1-b : détection d'un courant entraînant un point chaud avec modification du courant et Fig. 1-c : rétablissement du courant avec application d'une tension.



### Spectral 1501/1511 Spectroradiomètre VIS-NIR Haute Précision

- Longueurs d'onde : 380-780 nm, 380-1050 nm (VIS-NIR)
- Portable : Autonome (écran) ou PC (USB/Bluetooth)
- Applications : Mesures écrans & projecteurs, Sources Leds, Voyants automobile et aéronautique, Éclairage urbain...
- Atouts : HDR, stockage SD, visée laser



### Specbos 2501 Spectroradiomètre UV-VIS-NIR

- Longueurs d'onde : 380-780 nm (standard), 200-1050 nm (UV-VIS-NIR)
- Bande passante : 4 nm / 2 nm (HiRes)
- Modes : Radiance, Éclairage, Analyse couleur, Flux total, Intensité
- Interfaces : USB, Bluetooth, LAN/PoE
- Options : HiRes, Focus, Déclencheur
- Applications : LEDs, Lampes, Voyants automobile et aéronautique, Éclairage urbain, Mesures de sécurité photobiologique



Contact us for more information  
Phone: +33 (0) 34552700  
Email: info@scientec.fr

**SCIENTEC**  
www.scientec.fr



Figure 1-b). Cette transition de phase génère une impulsion électrique qui est ensuite mesurable. En effet, la région de détection devient résistive et un courant induit est détecté par des électrodes placées à chaque extrémité du nanofilament en méandres. C'est ce signal qui indique qu'un photon a été détecté. Pour éviter que la perturbation persiste trop longtemps et affecte les détections suivantes, le détecteur est souvent réinitialisé par un courant dit de rétablissement (Figure 1-c) pour ensuite revenir à son état initial supraconducteur (Figure 1-a) et être à nouveau prêt à l'emploi. Les SNSPDs les plus courants sont fait à base de matériaux de nitrures de titane (NbN) mais d'autres matériaux sont étudiés/utilisés à base de MgB2, WSi, MoGe ou encore à base de matériaux cuprates avec l'espoir dans ce cas de travailler à des températures au-dessus de 77 K pour utiliser un refroidissement à base d'azote plutôt que d'hélium. Cependant les SNSPDs à base de NbN restent les plus performants pour le moment et sur le marché actuel. De même, il est à garder en tête que la fabrication de tels détecteurs nécessite des moyens de nanofabrication et de dépôt de couches minces importants pour avoir une bonne qualité de dépôts de matériaux et ensuite un détecteur bien fabriqué, très souvent par des techniques de lithographie optique ou électronique, à base d'un faisceau d'électrons de résines photo ou électro-sensibles.

**PARAMÈTRES PERTINENTS**

Les détecteurs SNSPD se sont rapidement développés en raison de leurs spécifications uniques par rapport aux autres types de détecteur supraconducteurs (tels que les TES par exemple, nécessitant des températures sub-kelvin) ou encore par rapport aux photodiodes à avalanches (Single-Photon Avalanche Diode ou SPAD). Ces paramètres principaux sont : une grande efficacité de détection, donc un rendement de détection très élevé, souvent

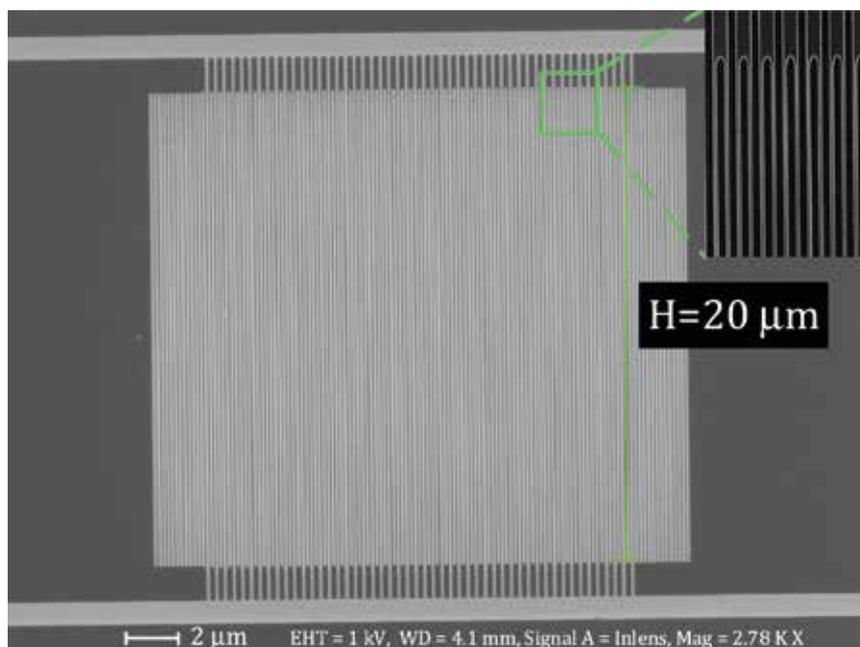
supérieur à 90 % pour des photons visibles ou proches infrarouges, cela veut donc dire sur une large gamme spectrale également; un temps de réponse ultra-court, de l'ordre de quelques dizaines de picosecondes, ce qui les rend adaptés à des applications nécessitant une détection de photons à des fréquences élevées et un faible bruit de fond (darkcount en anglais), ce qui leur permet de détecter un photon unique bien séparé électriquement du bruit électrique existant. Le tableau 1 présente les différents paramètres pertinents pour ces SNSPDs. Il est à noter que parmi les paramètres pertinents de ce tableau, la très bonne efficacité de détection dans les longueurs d'ondes télécom, à savoir dans les gammes autour de 1300 nm et de 1550 nm, est crucial pour la détection de photons uniques à ces longueurs d'ondes qui sont celles des communications actuelles par fibres optiques. Pour des applications notamment en communications quantiques, comme nous le verrons au paragraphe suivant, c'est un paramètre important en particulier lorsque celui-ci est couplé à une gigue temporelle très faible et donc des temps de détection très courts pour des hauts débits, nécessaires en communications optiques en général. On notera également

que le tableau 1 donne les valeurs typiques mais il faut garder en tête que ce domaine fait toujours l'objet d'importantes recherches et que certains détecteurs SNSPD ont démontré qu'ils pouvaient détecter jusqu'à 10 µm ou encore que le taux de coups d'obscurité pouvait être de moins de 1 cps sur une heure de détection. Enfin, on notera également les efforts qui sont déployés pour réaliser des capteurs imageurs SNSPD avec des détecteurs multi-pixels. Il est à noter un paramètre important qui est la possibilité pour un détecteur de mesures plusieurs photons à la fois, d'être en capacité de discriminer la détection de 1, 2, 3 photons ou plus. Aucun détecteur n'est pour le moment en capacité de le faire de façon efficace et l'idée d'une détection multi-pixel avec notamment plusieurs méandres de nanofils entrelacés est de pouvoir effectuer une mesure du nombre de photons en jouant sur les probabilités de détection et avec une information sur l'amplitude du signal électrique généré et détecté par le SNSPD.

La Figure 2 est une photographie de la structure typique en méandres d'un détecteur SNSPD. Sur cet exemple, les dimensions sont de 50 nm pour le diamètre du nanofils à base de NbN, pour une longueur totale de plusieurs

**Tableau 1.** Principaux paramètres et caractéristiques pertinentes d'un détecteur SNSPD.

PARAMÈTRES PERTINENTS	VALEURS TYPIQUES
Température d'opération	0,5 à 3 K
Gamme spectrale	400 à 2000 nm
Surface de détection	10 × 10 µm <sup>2</sup>
Taux de coups d'obscurité (cps)*	~ 100 à 400 cps
Gigue temporelle <sup>†</sup>	40 à 200 ps
Efficacité quantique de détection <sup>‡</sup>	> 90% à 1550 nm
Multi-pixels	4 à 28 nanofils entrelacés
* Taux de coups d'obscurité ou darkcounts en coups/seconde ou cps : bruit détecté intrinsèque du détecteur, sans lumière, dans le 'noir'	
† Gigue temporelle ou time jitter en ps ou ns : largeur typique des impulsions électriques sortantes du détecteur, définissant la résolution temporelle du détecteur	
‡ Efficacité quantique ou quantum efficiency : taux de conversion d'un photon en photo-électron qui se traduit dans le courant de sortie	



**Figure 2.** Micrographe obtenu par un microscope électronique de méandres de nanofils de  $\text{Mo}_{0,8}\text{Si}_{0,2}$  de largeur 50 nm, de période de 200 nm, sur une zone active de 20  $\mu\text{m}$  par 20  $\mu\text{m}$  (image tirée de [4]).

centaines de nanomètres et un écart typique entre deux méandres de 200 nm. Au passage, on notera que dans ce type de détecteur le facteur de remplissage est important (fill factor en anglais) qui peut être interprété comme le ratio surface de matériau supraconducteur (le nanofil) et surface sans matériau supraconducteur. Les géométries les plus adaptées sont à présent bien maîtrisées dans les SNSPDs sur le marché.

#### APPLICATIONS

La détection de lumière est un enjeu technologique important en général et la détection de photons uniques l'est en particulier dans le domaine des technologies quantiques en plein essor depuis les 10 dernières années. Les technologies quantiques comprennent 3 grands domaines, à savoir les communications quantiques, la simulation/l'ordinateur quantique et les capteurs quantiques. Le photon de lumière est intrinsèquement un objet quantique résultant de la quantification du champ électromagnétique et est donc central dans le domaine des technologies quantiques.

Dans le cas des communications quantiques, le photon de lumière est utilisé soit pour transporter l'information quantique (tout en maintenant les propriétés quantiques à savoir la superposition et l'intrication quantique) entre des ordinateurs quantiques par exemple et on parle alors d'internet quantique ou de réseaux quantiques, soit pour servir à faire de la cryptographie quantique et utiliser le photon de lumière comme un bit quantique ou qubit (quantum bit en anglais) pour générer des clés cryptographiques et sécuriser les données en théorie de façon inviolable même par un futur ordinateur quantique. Dans le cas de l'ordinateur quantique ou pour effectuer des simulations quantiques (dans ce cas il s'agit de simuler un système quantique que l'on ne connaît pas par un autre système quantique que l'on connaît et que l'on contrôle), il s'agit d'utiliser le photon de lumière comme qubit d'information (le pendant du bit d'information classique) et de générer une grande quantité de photons uniques qui vont interagir dans des circuits optiques pour effectuer des portes logiques quantiques et ●●●

High performance and reliable fiber optic assemblies



**PM+**

**Ultra high Polarization Extinction Ratio (PER)**

- Up to +4dB higher PER
- State-of-the-art insertion Loss (IL) and Return Loss (RL) values
- Best connector type and tolerance E-2000®, DMI, Mini AVIM® and Micro AVIM®
- Available on homologated fibres and cables

**16W**



**NEW**

**E-2000® PS+**  
Contact expanded beam

- Low loss
- Interlock solution optional
- 1310-1550nm or 980-1060nm

**100W**



**E-2000® PSm**

Contact pump laser connector

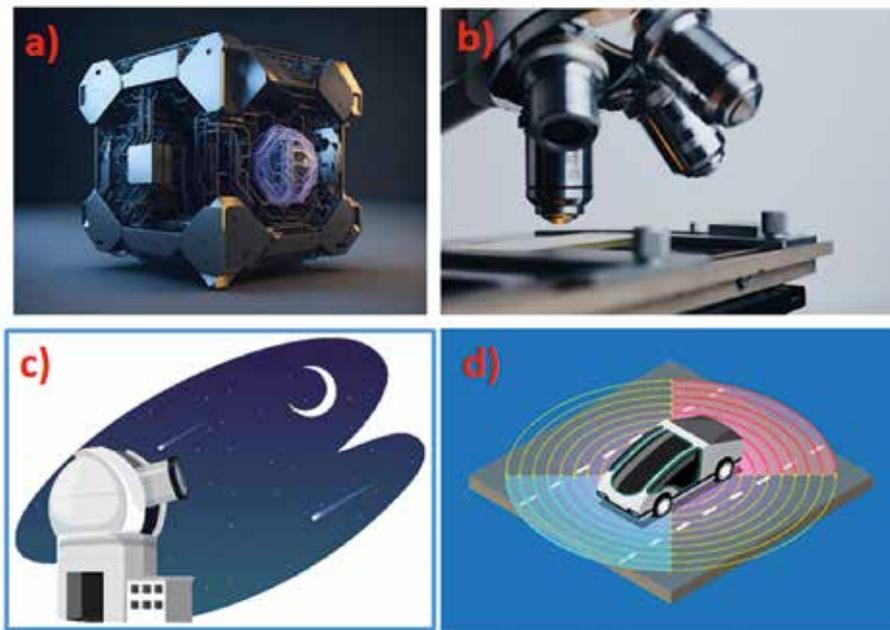
- Low loss
- Interlock solution optional
- MM 105 0.22NA (MM 200 0.22NA optional)



[www.2blighting.fr](http://www.2blighting.fr)

[info@2blighting.com](mailto:info@2blighting.com)

+33 1 64 59 21 30



**Figure 3.** Champs d'applications des détecteurs SNSPD avec a) les technologies quantiques, b) la tomographie cohérente optique, c) la détection infra-rouge pour l'astronomie et d) le LIDAR.

effectuer des calculs quantiques complexes avec l'espoir de résoudre des problèmes calculatoires insolubles ou difficile à résoudre par ailleurs. Enfin, la troisième application est d'utiliser la lumière pour faire des capteurs quantiques. Par définition, un détecteur de photons uniques est déjà un capteur quantique puisqu'il s'agit d'un système qui transforme un photon de lumière en impulsion électrique mesurable et notamment pour les deux applications déjà mentionnées, à savoir les communications quantiques et le calcul quantique. La détection de photons uniques rentre également dans la catégorie des capteurs notamment pour du LIDAR (Light detection and ranging en anglais, télédétection par la lumière en français) ou encore pour faire de la spectroscopie de corrélation diffuse et de la réflectométrie optique temporelle qui dans les deux cas vont servir pour faire de l'imagerie notamment pour la biologie dans des milieux diffusants et en particulier dans des longueurs d'ondes du proche infra-rouge, vers 2 000 nm [5]. En

termes d'applications, on notera également la détection de signaux faibles aux longueurs d'ondes infra-rouges pour l'astronomie, l'astrophysique

et le domaine spatial en général qui, historiquement, a toujours été demandeur de capteurs ultra-sensibles. La figure 3 présente de façon schématique les grands champs d'applications des détecteurs à photons uniques tels que les SNSPDs.

**CONCLUSION**

Les détecteurs à photons uniques connaissent un développement rapide depuis les dix dernières années et en particulier les détecteurs à base de nanofil supraconducteur des SNSPDs. Les applications pour de tels détecteurs ultra-sensibles sont nombreuses et variées et la technologie et l'ingénierie nécessaire pour de tel produit a fortement évolué et rendu leur utilisation plus versatile malgré le fait qu'ils nécessitent un refroidissement à quelques kelvins pour fonctionner. Les SNSPDs n'ont pas fini de se développer pour aller vers des détecteurs imageurs, pour aller vers des longueurs d'ondes de plus en plus grandes dans le domaine des micro-ondes mais également pour aller vers des détecteurs de plus en plus rapides. ●

RÉFÉRENCES

- [1] G. N. Gol'tsman *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **79**, 705 (2001)
- [2] C. M. Natarajan *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **25**, 063001 (2012)
- [3] I. E. Zadeh *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **118**, 190502 (2021)
- [4] F. Li *et al.*, *Photonics Research* **9**, 389 (2021)
- [5] Robert H. Hadfield *et al.*, *Optica* **10**, 1124 (2023)

**Tableau 2.** Principaux fournisseurs de détecteurs SNSPD.

FURNISSEUR (PAYS)	SITES INTERNET
IdQuantique (Suisse)	<a href="https://www.idquantique.com/">https://www.idquantique.com/</a>
Pixel Photonics (Allemagne)	<a href="https://www.pixelphotonics.com/">https://www.pixelphotonics.com/</a>
Photon Spot (États-Unis)	<a href="https://photonspot.com/">https://photonspot.com/</a>
Photon Technology SRL (Chine/Italie)	<a href="https://www.snspsd.com/">https://www.snspsd.com/</a>
Quantum Opus (États-Unis)	<a href="https://www.quantumopus.com/">https://www.quantumopus.com/</a>
Quantum Scopes (Suède)	<a href="https://www.quantumscopes.com/">https://www.quantumscopes.com/</a>
SingleQuantum (Pays-Bas)	<a href="https://www.singlequantum.com/">https://www.singlequantum.com/</a>

## Capteurs 3D à double fréquence pour l'inspection qualité et la métrologie



L'ECCO X 100 est un capteur 3D offrant un balayage rapide jusqu'à 40 kHz et une résolution de 4096 points 3D par profil, adapté à l'inspection industrielle automatisée. Disponible en versions laser bleu (450 nm) et rouge (660 nm), il permet une flexibilité d'application, notamment en évitant les interférences en configuration multi-capteurs.

<https://www.smartray.com/3d-sensors/ecco-x-100/>

## LASER FEMTOSECONDE ACCORDABLE

Le Chameleon Discovery LX de Coherent Corp. délivre des impulsions ultracourtes de 100 fs et dispose d'une plage de longueurs d'onde accordable de 680 à 1080 nm



avec une puissance de sortie de 3,2 W au pic de la courbe de gain. Le Chameleon Discovery LX II intègre des fonctionnalités avancées telles qu'une pré-compensation de dispersion de vitesse de groupe intégrée et une modulation de puissance rapide. Il est particulièrement bien adapté à la microscopie non linéaire et la spectroscopie ultrarapide.

[www.coherent.com](http://www.coherent.com)



## Microscope numérique entièrement motorisé

Le microscope numérique entièrement motorisé DSX2000-Evident est conçu pour simplifier les opérations et augmenter la productivité dans les processus d'analyse et d'inspection des matériaux. Le microscope numérique DSX2000 produit des images à haute résolution qui répondent aux exigences strictes en matière de contrôle qualité, d'analyse des défaillances et de R&D.

<http://evidentscientific.com/fr/products/digital/dsx2000>

## LASER DPSS



La série DP de lasers DPSS Q-Switched de Photonix Industries délivre des impulsions pouvant atteindre 20 mJ, une sortie

TEM00 et une émission de chaleur minimisée. Elle offre la possibilité de sélectionner ou de mélanger plusieurs longueurs d'onde (IR, vert, UV, DUV) et est proposée dans un format compact refroidi par air, adapté aux applications industrielles comme le marquage interne du verre et la réparation d'écrans.

<https://www.photonix.com/product/dp-series/>

## Réfectomètre haute résolution

Utilisant la technologie OLCR (optical low-coherence reflectometry), l'AQ7420-Yokogawa est particulièrement adapté à l'analyse de



la structure interne des modules optiques et à la visualisation des microfissures dans les connecteurs optiques. L'AQ7420 offre une résolution spatiale de 40 µm ainsi qu'une sensibilité pour les mesures de réflexion arrière, allant jusqu'à -100 dB ou moins, sans bruit parasite.

[https://www.wavetel.fr/wp-content/uploads/2025/01/Yokogawa-PR001-2025-AQ7420-high-resolution-reflectometer\\_FINAL\\_FR.pdf](https://www.wavetel.fr/wp-content/uploads/2025/01/Yokogawa-PR001-2025-AQ7420-high-resolution-reflectometer_FINAL_FR.pdf)



# VESCENT



/ Peigne de fréquences OEM & horloge optique



PRÊT POUR  
L'INDUSTRIE !

## / APPLICATIONS

- ▲ Horloges atomiques/optiques
- ▲ Time Transfer
- ▲ Dual comb spectroscopie

## / CARACTÉRISTIQUES

- ▲ **Clé en main** - 30 min & go ! 
- ▲ **Compact** 
- ▲ **Ultra-robuste** 

# VEXLUM



## / VXL - OEM VECSEL Laser

Pour Refroidissement atomique, Piégeage optique, Horloge optique

## / CARACTÉRISTIQUES

- ▲ **Design modulaire** orienté SAV
- ▲ **Aucun ASE**
- ▲ **Haute puissance** (ex : 5W à 556nm)
- ▲ Toutes les longueurs d'ondes de 350 à 2150nm



Votre contact : Baptiste.Callendret@optonlaser.com