



Des puces photoniques pour sortir les communications quantiques du laboratoire

Olivier Alibart

► To cite this version:

Olivier Alibart. Des puces photoniques pour sortir les communications quantiques du laboratoire. Physique Quantique [quant-ph]. Université Côte D'Azur, 2025. tel-05146337

HAL Id: tel-05146337

<https://theses.hal.science/tel-05146337v1>

Submitted on 5 Jul 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright



**HABILITATION À
DIRIGER DES RECHERCHES**

Photonique Quantique

Des puces photoniques pour sortir les
communications quantiques du laboratoire

Olivier ALIBART

Institut de Physique de Nice

**Présentée en vue de l'obtention du
grade d'habilitation à diriger des
recherches en Physique de
l'Université Côte d'Azur**

Soutenue le : 10/06/2025

Devant le jury, composé de :

Eleni, Diamanti, Directrice de
recherche, CNRS, LiP6

Ariel Levenson, Directeur de recherche,
CNRS, C2N

Gian-Luca Lippi, Professeur,
Université Côte d'Azur, INPHYNI

John G. Rarity, Professeur, Université
de Bristol, NSQI

Isabelle Robert-Philip, Directrice de
recherche, CNRS, L2C

Sébastien Tanzilli, Directeur de
recherche, CNRS, INPHYNI

Résumé

Mon travail de recherche s'inscrit dans le contexte de la photonique quantique, c'est-à-dire l'exploitation des observables physiques portées par les photons pour réaliser des opérations destinées aux communications quantiques. En pratique, ces travaux partagent tous un aspect important : l'exploitation de l'optique guidée comme « technologie habilitante ». Mes activités ont commencé en 2001 au laboratoire de Physique de la Matière Condensée puis ont continué lors de mon séjour post-doctoral à l'université de Bristol de 2004 à 2006. Enfin depuis 2006, je conduis mes activités de recherche dans l'équipe *Photonique & Information Quantique* de l'Institut de Physique de Nice.

Ces travaux couvrent une vingtaine d'années de recherche. Il faut comprendre que toutes ces expériences forment un socle de connaissances et de techniques qui me permettent aujourd'hui de positionner favorablement mes activités dans la "seconde révolution quantique" qui enjoint les équipes de recherche à sortir leurs systèmes quantiques hors du laboratoire, collaborer avec des industriels afin de proposer des réalisations très appliquées de communications quantiques en champ réel. Mes activités actuelles visent l'innovation et s'attachent à répondre aux besoins nouveaux liés au déploiement en champ réel, tels que la synchronisation, la stabilisation d'interféromètres distants, la cohabitation des signaux classiques et quantiques au sein d'un même réseau, tout en investiguant des cas d'usage.

Abstract

My research activities falls in the context of quantum photonics, i.e. the exploitation of physical observables carried by photons to perform operations for quantum communications. In practice, all this work shares one important aspect : the exploitation of guided optics as an « enabling technology ». My activities began in 2001 at the laboratoire de Physique de la Matière Condensée, then continued during my post-doctoral fellowship at the University of Bristol from 2004 to 2006. Since 2006, I have been working in the *Quantum Information & Photonics* team at the Institut de Physique de Nice.

My work spans over twenty years of research. It's important to understand that all these experiments consitute a foundation of knowledge and techniques that allow me today to position my research activities favorably in the “second quantum revolution”, which is urging research teams to take their quantum systems out of the laboratory and collaborate with industrials group to propose highly applied realizations of real-field quantum communications. My current activities are focused on innovation and on

answering to the needs of real-field deployment, such as synchronization and stabilization of remote interferometers, and the coexistence of classical and quantum signals within the same network, while investigating new use cases.

Table des matières

1	Introduction à l'information et aux technologies quantiques	7
1.1	Le qbit dans tous ses états	11
1.2	Les technologies quantiques	13
1.2.1	Le calcul quantique	13
1.2.2	La simulation quantique	17
1.2.3	La métrologie quantique	19
1.2.4	La communication quantique	23
1.3	Les communications quantiques déployées en champ réel	25
1.3.1	Enjeux et défis	25
1.3.2	État de l'art	29
2	Activités de recherche	43
2.1	Sources de paires de photons	44
2.1.1	sur niobate de lithium	45
2.1.2	sur silice	54
2.2	Manipuler les états quantiques	56
2.2.1	Connecter ensemble des systèmes quantiques	56
2.2.2	Circuits photoniques avancés	65
2.2.3	Transposition en fréquence	71
2.3	Des expériences en champ réel	74
2.3.1	Big Bell test	74
2.3.2	Réseau Quantum@UniCA	76
3	Activités pédagogiques	97
3.1	Activités pédagogiques	97
3.2	Responsabilités pédagogiques	100
3.3	Diffusion scientifique	100
3.3.1	Animation pédagogique sur les inégalités de Bell	100
3.3.2	Le Décodeur Minute UCA	101
3.3.3	Sciences pour tous	102
3.3.4	Articles scientifiques dans la revue Photoniques	102
4	Curriculum vitae détaillé	107
4.1	Déroulé de carrière	107

4.2	Activités scientifiques	110
4.2.1	Responsabilités scientifiques et animation de la recherche	110
4.2.2	Encadrement doctoral et scientifique	118
4.2.3	Expertise, rayonnement et diffusion	122
4.3	Activités pédagogiques	124
4.3.1	Activités d'enseignement	124
4.3.2	Responsabilités pédagogiques	125
4.4	Responsabilités collectives	125
5	Notice bibliographique personnelle	127
	Bibliographie générale	138

Chapitre 1

Introduction à l'information et aux technologies quantiques

J'ai soutenu ma thèse de docteur en physique en 2004.

20 ans ! C'est long pour soutenir une HDR mais cela va nous permettre de mesurer l'incroyable tournant technologique qu'est en train de vivre la physique quantique en l'espace de quelques décennies. Nous verrons cela au travers de quelques exemples de l'introduction mais aussi de la présentation de mes travaux de recherche. Pour l'instant, l'objectif de cette introduction est volontairement d'être pédagogique et de surfer sur des exemples simples afin d'illustrer les différents aspects du domaine qui est maintenant appelé « sciences & technologies quantiques ».

Aujourd'hui nous vivons la seconde révolution quantique [1, 2] qui positionne les technologies quantiques comme une activité de recherche appliquée très soutenue financièrement dont le taux de création de start-up est parmi les plus élevés parmi les technologies disruptives et à laquelle les agences de conseil s'intéressent de près¹ (voir les Figure 1.1 et Figure 1.2). Mais avant de rentrer dans les détails, re-situons le contexte.

La première révolution quantique prit place au début du siècle dernier, découlant de travaux visant à proposer un modèle théorique à même de reproduire les résultats obtenus lors d'expériences sur le rayonnement du corps noir [3]. De cette théorie surgit l'idée fondamentale de la complémentarité onde-corpuscule selon laquelle, pour reprendre les termes de Louis de Broglie, « deux conceptions apparemment incompatibles peuvent chacune représenter un aspect de la vérité » [4]. De cette simple idée découlent toutes les percées scientifiques et technologiques associées à cette première révolution quantique. Une fois réalisé comment un électron agit comme une onde, il est alors possible de comprendre la table périodique des éléments, les interactions chimiques et les fonctions d'ondes électroniques qui sous-tendent la physique des semi-conducteurs. Ce dernier domaine d'étude nous a conduit à l'ère de l'information et à l'avènement de l'industrie de l'informatique. D'autre part, le fait qu'une onde lumineuse puisse aussi être traitée comme étant composée de particules, les fameux photons, nous a permis d'appréhender

1. <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/quantum-technology-sees-record-investments-progress-on-talent-gap>

l'effet photoélectrique [5], à l'origine entre autres des cellules photovoltaïques. Enfin, le concept de photon est également à l'origine de notre compréhension de l'effet laser. Au cours du siècle dernier, cette première révolution quantique a permis l'émergence d'un grand nombre des technologies de base alimentant le quotidien de la société moderne.

Dans ce contexte, une centaine d'années après l'émergence de la théorie quantique, la deuxième révolution quantique laisse entrevoir un nombre non négligeable d'avancées technologiques clefs pour le vingt-et-unième siècle.

La caractéristique de cette seconde révolution est la prise de conscience que nous ne sommes plus les observateurs passifs du monde quantique que la nature nous offre. Avec la première révolution quantique, nous avons utilisé la physique quantique pour comprendre ce qui « existait déjà ». Nous pouvions expliquer la table périodique, mais nous ne pouvions pas concevoir et construire nos propres atomes. Nous pouvions expliquer comment les métaux et les semi-conducteurs se comportent, mais nous ne pouvions pas vraiment manipuler ce comportement. La différence entre science et technologie tient dans le fait que la première est une entreprise de recherche visant à produire de la connaissance, tandis que la deuxième est son prolongement à des fins applicatives. Ainsi, nous nous attelons aujourd'hui à exploiter le monde quantique qui nous entoure. En d'autres termes, l'heure est à la manipulation des ressources pour concevoir nos propres états quantiques de la lumière et de la matière, afin de développer de nouveaux dispositifs. Par exemple, en plus d'expliquer la table périodique, nous pouvons créer de nouveaux atomes artificiels - boîtes quantiques et excitons - auxquels nous pouvons attribuer les propriétés électroniques et optiques de notre choix. Nous pouvons créer des états en tant que superpositions cohérentes d'autres états ainsi que des états intriqués présentant des corrélations non-locales. Ces nouveaux états quantiques, façonnés à dessein, ouvrent la voie au développement de processeurs [6], de simulateurs [7], de dispositifs métrologiques [8, 9] et de systèmes de cryptographie [10, 11] dits quantiques. Ainsi, bien que la physique quantique en tant que science a grandement mûri, l'ingénierie quantique en tant que technologie se dessine maintenant à part entière.

Avant d'aller plus, je souhaiterais illustrer ce changement d'attitude qui s'est opéré tout au long de ces 20 années de recherche dans le domaine de la photonique et de l'information quantique à l'aide de « clichés » des années 2001 et 2024, construits à partir d'extraits de thèses, de blog ou de livres.

En 2001 :

Vous pouviez lire :

- *Quantum information : An Introduction to Basic Theoretical Concepts and Experiments* de A. Zeilinger aux éditions Springer,
- *Quantum Computation and Quantum Information* de M. A. Nielsen et I. L. Chuang aux éditions Cambridge University Press,

Plusieurs fils d'actualité présentaient l'expérience remarquable d'une équipe de recherche du ministère de la défense anglais menée par J. G. Rarity.

- *Les scientifiques de DERA établissent un record du monde de 1,9 km pour l'échange de clefs sécurisé en espace libre à l'aide de la cryptographie quantique.*

Enfin, le ton de l'introduction de la thèse de S. Tanzilli [12] permet également de se faire un instantané assez précis de l'état de la recherche.

- *... Dans le même temps, un nombre impressionnant d'idées théoriques regroupées sous l'appellation « communications quantiques » ont vu le jour ces dernières années. (...) Toutefois, mis à part la distribution quantique de clefs pour la cryptographie à photons uniques ou à paires de photons, les réalisations expérimentales sont encore loin d'accomplir les prouesses escomptées par la théorie.*

En 2024 :

Vous pouvez lire :

- *Totally Random – Why Nobody Understands Quantum Mechanics : a Serious Comic on Entanglement* de T. Bub and J. Bub aux éditions Princetown University Press,
- *Schrödinger's Killer App : Race to Build the World's First Quantum Computer* de Jonathan P. Dowling aux éditions CRC Press.
- *Quantix : La physique quantique et la relativité en BD* de L. Schafer aux éditions Dunod.
- *Le Mystère du monde quantique* en BD de M. Burniat et T. Damour aux éditions Dargaud.
- *Light Keys : A Quantum Graphic Novel* de M. Prokic édité par QetLabs.

Le fil d'actualité du MIT technology review présente la bataille Google/IBM pour la première réalisation d'un ordinateur quantique démontrant l'avantage quantique :

- *The Google-IBM "quantum supremacy" feud* de W. Roush.

tandis que Samsung et IdQuantique officialisent la cinquième génération de smartphone disposant d'une puce exploitant les technologies quantiques, qu'Apple certifie la sécurité de iMessage grâce à de la cryptographie post-quantique et que la Chine établit le record du déploiement d'un réseau de cryptographie quantique qui couvre 4600 km. Il est enfin intéressant de lire quelques titres des news & views du site Nature :

- *The race for the ideal single-photon source is on* de P. Senellart.
- *Quantum supremacy : A three minute guide* de E. Gibney.
- *IBM releases first-ever 1,000-qbit quantum chip* de D. Castelvechi.
- *Entanglement-enhanced sensor networks* de L. Pezzè.

Nous distinguons clairement un changement de ton en deux décennies. En 2001, nous constatons que les titres des ouvrages restent très conventionnels, alors qu'en 2024, non seulement les titres abusent des superlatifs mais la culture populaire s'est emparée de la physique quantique au travers des bandes dessinées mais aussi du cinéma avec des films comme *the Avengers : Endgame*², *Antman*, ou encore la série anglaise *DEVS*.

Plus sérieusement, nous observons une accélération importante des efforts consacrés à la recherche soutenus par une prise de conscience par les institutions publiques mais également privés de l'importance d'investir dans la recherche appliquée. Ces dernières années, les investissements dans les technologies quantiques ont connu une augmentation exponentielle dans le monde entier dont l'apogée a été atteint en 2021 comme illustré sur la Figure 1.1. La création de startups dans le domaine des technologies quantiques est également un bon indicateur dont le ralentissement ces dernières années est en partie attribué aux difficultés de recrutement de talents puisque la plupart des spécialistes expérimentés (souvent des académiques) travaillent déjà dans une startup et que les formations adaptées n'existent pas encore (en 2020 en tout cas).

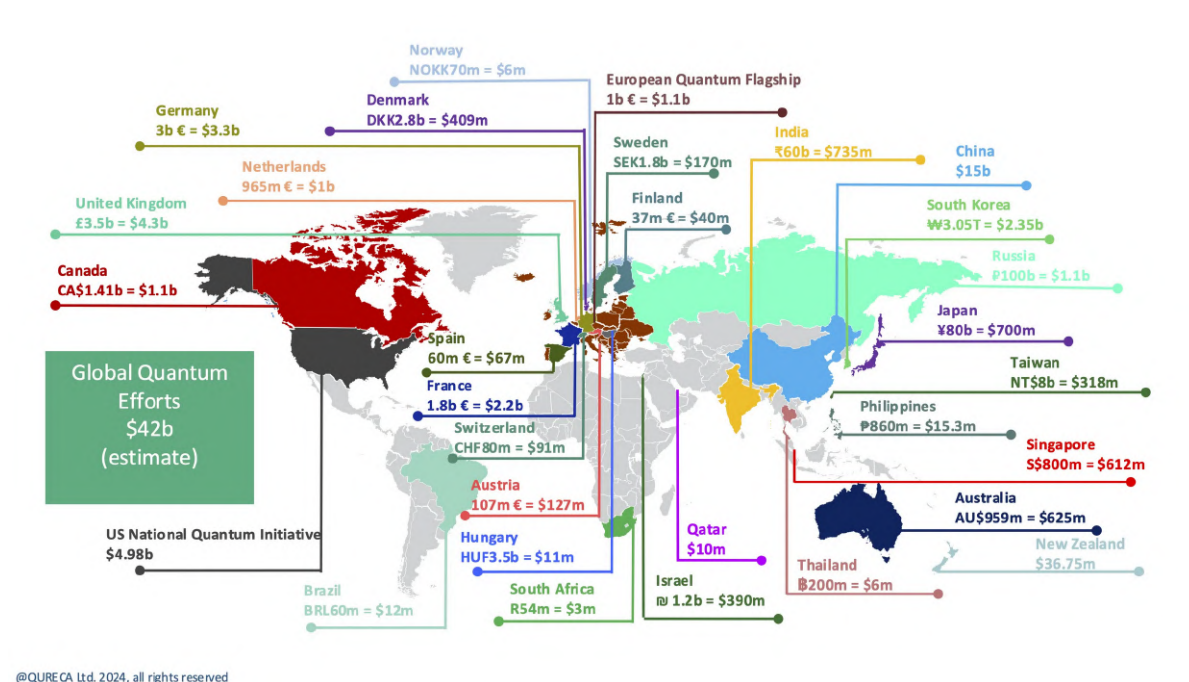


Figure 1.1 — Investissement de chaque pays pour le développement des technologies quantiques en dollars. Image tirée de <https://www.quireca.com/fr/quantum-initiatives-worldwide/>

Enfin, le 7 juin 2024, les Nations Unies ont proclamé 2025 (qui marque les 100 ans de la création de la théorie quantique) comme l'Année Internationale de la Science et

2. <https://www.phys.org/news/2019-04-avengers-endgame-exploits-quantum-mechanics.html>

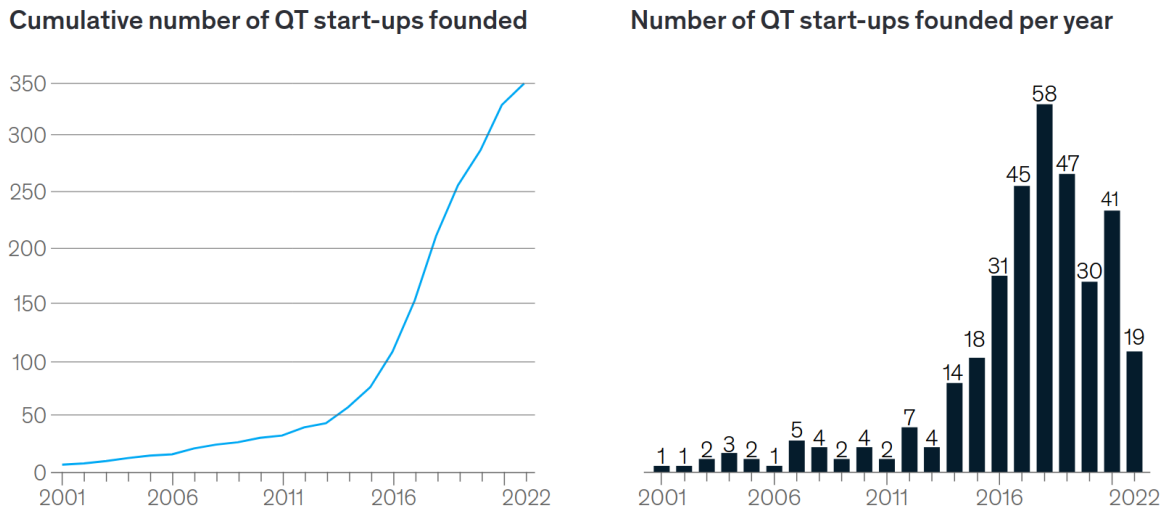


Figure 1.2 – Nombre de création de startup dans le domaine des technologies quantiques. La taux de création annuel de startups montre un ralentissement ces dernières années. Il est en partie attribué aux difficultés de recrutement de talents à cause du manque de formations adaptées en technologies quantiques. Image tirée de Quantum Technology Monitor de l'agence McKinsey.

de la Technologie Quantiques afin « d'accroître la sensibilisation du grand public à l'importance de la science et des applications quantiques (sic) ». À ce titre, l'initiative de J. Bobroff (professeur à l'Université Paris Saclay) est remarquable puisqu'à cette occasion, il va partager pendant un an les images préférées de 100 chercheuses et chercheurs en quantique³.

Il ne s'agit pas tant d'une course quantique, que d'un effort global pour développer une nouvelle technologie quantique ! C'est une période d'innovation étonnante et passionnante que nous vivons actuellement à la fois pleine d'inconnu et de promesses.

1.1 Le qbit dans tous ses états

Les systèmes de communication sont basés aujourd'hui sur une entité universelle appelée le bit, pour coder et traiter l'information. Cette appellation, issue du terme anglophone « binary digit », illustre le choix d'encoder l'information dans un système représenté en base 2. Cela permet d'implémenter un alphabet de la manière la plus simple possible. Il suffit d'utiliser, par exemple, dans les communications par fibre optique deux

3. https://vulgarisation.fr/projet/images_quantiques/

valeurs d'intensité lumineuse différentes, dans des circuits électroniques deux valeurs de la tension/courant, ou bien pour le stockage dans les disques durs deux directions de magnétisation différentes. Cette liste n'est, bien entendu, pas exhaustive et nous ne rentrerons pas dans plus de détails quant aux supports et moyens qui servent à exploiter l'encodage classique de l'information.

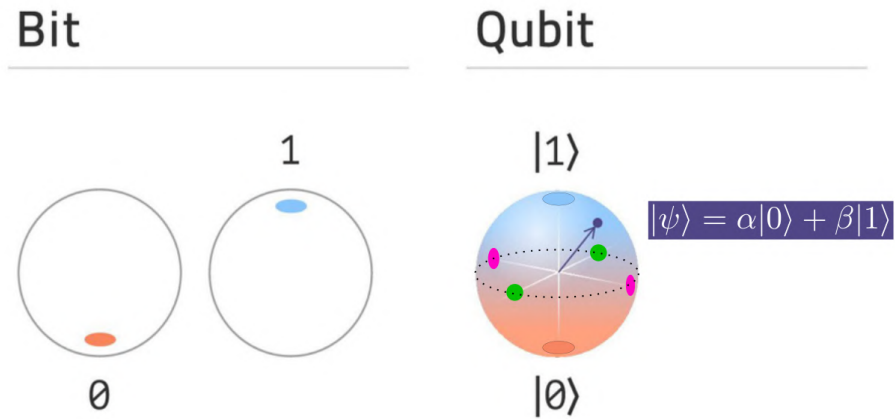


Figure 1.3 – Représentations d'un bit et d'un qbit $|\psi\rangle$. Tandis que le bit ne peut occuper que deux états distincts, le qbit est infiniment plus riche. Il peut prendre n'importe quel état situé sur la surface de la sphère. Il existe des points remarquables tels que les pôles nord et sud, que l'on associe respectivement aux états $|0\rangle$ et $|1\rangle$, qui correspondent exactement aux états dit « classiques », 0 ou 1. Il existe également quatre autres points remarquables situés sur l'équateur. Il s'agit des superpositions cohérentes des états $|0\rangle$ et $|1\rangle$. C'est en partie ces états dit « non-classiques » qui font la richesse de l'information quantique.

En information quantique, on ne code plus l'information sur des bits mais sur des qbits, appellation utilisée pour la première fois par Schumacher [13] et qui contracte les deux termes anglais quantum et bits. À l'instar du bit, le qbit peut prendre deux valeurs permettant de coder l'information en base 2 mais à la différence près que ces deux valeurs correspondent à un jeu de valeurs propres d'un vecteur évoluant dans une base de dimension 2 complexe. La représentation graphique usuelle se fait donc dans un espace vectoriel réel *en 3 dimensions* comme présentée sur la Figure 1.3. De la même façon que les états d'une quelconque représentation quantique, les qbits peuvent donc être dans une superposition cohérente telle que :

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

où α et β sont des amplitudes de probabilité et pour lesquels, dans le cas d'états $|\psi\rangle$ purs, la condition de normalisation $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ doit être respectée. Cette notation implique

qu'un qbit peut être dans une infinité d'états puisque le vecteur $|\psi\rangle$ peut pointer dans n'importe quelle direction de la sphère de Bloch-Poincaré de la Figure 1.3.

L'intrication est l'extension de la notion de superposition cohérente à plusieurs qbits corrélés. Il s'agit plus spécifiquement de la superposition cohérente des corrélations d'une observable physique de chaque particule, i.e. : « si la particule A \equiv 0, alors la particule B \equiv 0 ou si la particule A \equiv 1, alors la particule B \equiv 1 ». En pratique, pour une paire de qbits, les états maximalement intriqués sont au nombre de 4 et forment une base permettant de décrire n'importe quelle paire de qbits.

$$\begin{aligned} |\Phi^+\rangle &= \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}} \\ |\Phi^-\rangle &= \frac{|00\rangle - |11\rangle}{\sqrt{2}} \\ |\Psi^+\rangle &= \frac{|01\rangle + |10\rangle}{\sqrt{2}} \\ |\Psi^-\rangle &= \frac{|01\rangle - |10\rangle}{\sqrt{2}} \end{aligned}$$

Présenté sous cet angle, difficile de voir l'intérêt de ces états, mais c'est lorsque qu'une paire de qbits est justement « placée » spécifiquement dans un de ces 4 états que tout devient intéressant. En fait, chaque élément de cette base correspond à un état non factorisable puisque ces états (dits de Bell) sont impossibles à écrire comme le produit d'un état associé à un qbit A avec un autre associé au qbit B. Il devient alors impossible de considérer individuellement chaque qbit et les corrélations que portent ces paires de qbits vont bien au-delà des corrélations classiques [14, 15] au point qu'elles ouvrent de nouvelles possibilités que nous verrons dans la suite.

1.2 Les technologies quantiques

La physique quantique, autrefois cantonnée à décrire les lois de la nature au sein d'instituts de recherche, permet aujourd'hui le développement de technologies nouvelles ayant le potentiel d'impacter la société civile. Dans les sections qui suivent, nous présentons succinctement les différentes technologies quantiques faisant actuellement l'objet d'intenses recherches aussi bien fondamentales qu'appliquées, à savoir : le calcul, la simulation, la métrologie et la cryptographie quantique.

1.2.1 Le calcul quantique

Les tâches de calcul sont généralement classées suivant le type de relation existant entre le volume des opérations à effectuer et la taille du problème [16]. Si le nombre

d'opérations augmente comme une puissance entière de la taille N du problème, on dit que ce dernier appartient à la classe de complexité polynomiale dénotée, de manière abrégée, par la lettre P. Si par contre le nombre d'opérations augmente plus rapidement qu'une fonction polynomiale, alors le problème est dit appartenir à une classe de complexité non-polynomiale (NP). Un petit exemple est le bienvenu ici. *Les problèmes de classe NP s'identifient généralement au problème du voyageur de commerce qui doit « visiter » de nombreuses villes (26), disons Amiens, Brest, Chartres, Dunkerque, ..., Lyon, Montpellier, Nice, Orsay, Paris ..., Xertigny, Yvré-l'Evêque et Zutkerque. Son objectif est d'optimiser son temps de voyage (et ses frais d'essence) en trouvant le chemin le plus court qui relie une seule fois chacune de ces 26 villes. Ce type de problème ne dispose pas d'algorithme classique plus efficace que de calculer le temps de chaque parcours et de chercher le plus court. En d'autres termes, si quelqu'un vous donne la solution, il est très rapide de vérifier que c'est la bonne dans un temps polynomial, mais s'il faut chercher la solution ça devient non-polynomial. En effet, le nombre de chemins possibles croît selon la fonction factorielle (de type exponentielle) ce qui dans le cas des 26 villes s'écrit $26! = 26 \times 25 \times \dots \times 3 \times 2 \times 1$ et prend la valeur numérique 403291461126605635584000000. À raison d'une nanoseconde par calcul sur un ordinateur classique, ce calcul prendrait environ 12 milliards d'années. Évidemment ce genre de problème a des implications bien plus grandes que réduire la facture d'essence d'un voyageur de commerce. Il trouve des applications dans la planification de tâches et d'optimisation de ressources pour la distribution d'énergie. À titre d'exemples : Orange a besoin de distribuer aussi efficacement que possible (le temps de parcours) le flux de données entre N utilisateurs situés sur un immense réseau de communication ; EDF a besoin d'optimiser la distribution de l'électricité (la longueur de câbles haute-tension) entre ses centrales de production et les utilisateurs répartis sur un immense réseau de distribution ; L'agence spatiale européenne a besoin d'optimiser la séquence des tâches à bord d'un satellite pour assurer son fonctionnement au quotidien. Bref, tout ces exemples sont des problèmes de type NP et ont des implications concrètes dans nos modèles économiques.*

Un autre exemple important est la factorisation de grands entiers qui a des répercussions sur l'axe des communications sécurisées que nous aborderons à la section 1.2.3. Actuellement, la seule façon de trouver les facteurs premiers d'un grand nombre entier N est de diviser N par tous les entiers impairs jusqu'à \sqrt{N} et de vérifier s'il y a un reste ou non. Cette procédure de division requiert environ N opérations supplémentaires chaque fois que nous ajoutons un chiffre à N . En d'autres termes, le nombre d'opérations augmente exponentiellement avec N . De ce fait, en augmentant N , le temps de calcul nécessaire pour trouver les facteurs premiers augmente également de manière exponentielle. C'est précisément ce qui garantit la sécurité des protocoles de cryptographie à clés publiques nommé RSA, d'après les initiales de ses trois inventeurs, utilisé sur internet notamment pour le commerce électronique [17]. En effet, décrypter les clés utilisées au quotidien de 2048 bits prendrait des temps incommensurables...

Dans une certaine mesure, ces problèmes englobent également les démonstrations expérimentales de type « bosons sampling », présentées sur la Figure 1.5, qui ont enflammé

Nb de noeuds	Nombre de chemins possibles	
1	1	1,00E+00
2	2	2,00E+00
3	6	6,00E+00
4	24	2,40E+01
5	120	1,20E+02
6	720	7,20E+02
7	5040	5,04E+03
8	40320	4,03E+04
9	362880	3,63E+05
10	3628800	3,63E+06
11	39916800	3,99E+07
12	479001600	4,79E+08
13	6227020800	6,23E+09
14	87178291200	8,72E+10
15	1307674368000	1,31E+12
16	20922789888000	2,09E+13
17	355687428096000	3,56E+14
18	6402373705728000	6,40E+15
19	121645100408832000	1,22E+17
20	2432902008176640000	2,43E+18
21	51090942171709400000	5,11E+19
22	1124000727777610000000	1,12E+21
23	2585201673888500000000	2,59E+22
24	620448401733239000000000	6,20E+23
25	15511210043331000000000000	1,55E+25
26	4032914611266060000000000000	4,03E+26
27	10888869450418400000000000000	1,09E+28
28	304888344611714000000000000000	3,05E+29
29	8841761993739700000000000000000	8,84E+30
30	26525285981219100000000000000000	2,65E+32
31	82228386541779200000000000000000	8,22E+33
32	263130836933694000000000000000000	2,63E+35
33	868331761881189000000000000000000	8,68E+36
34	2952327990396040000000000000000000	2,95E+38
35	10333147966386100000000000000000000	1,03E+40
36	371993326789901000000000000000000000	3,72E+41
37	1376375309122630000000000000000000000	1,38E+43
38	5230226174666010000000000000000000000	5,23E+44
39	20397882081197400000000000000000000000	2,04E+46
40	81591528324789800000000000000000000000	8,16E+47

Figure 1.4 – Visualisation « directe » de l’augmentation exponentielle de la difficulté calculatoire en action pour le voyageur de commerce.

le monde du calcul quantique à base de systèmes photoniques entre 2016 et 2020 [18, 19]. Je invite le lecteur à lire la référence [20] qui relie remarquablement bien les processus d’interférence à N photons au calcul du permanent⁴ d’une matrice qui est un problème de classe NP.

Les ordinateurs actuels sont capables de traiter des problèmes de la classe P sans trop de difficulté. Si le problème est pour l’instant trop difficile à résoudre, la loi de Moore nous prédit que nous devrions être capables de le résoudre dans un futur proche compte tenu de la croissance exponentielle⁵ de la puissance de calcul. En revanche, les problèmes de classe NP restent quant à eux toujours difficiles voir impossibles à traiter. Une légère augmentation de taille du problème se traduit dans ce cas par une forte augmentation de la puissance de calcul nécessaire.

Comment l’ordinateur quantique peut-il faire mieux ? Ceci provient de l’exploitation avantageuse de la notion de superposition d’états. En conséquence, la superposition

4. Un cousin du déterminant en mathématique

5. malgré quelques signes de ralentissement ces dernières années. . .

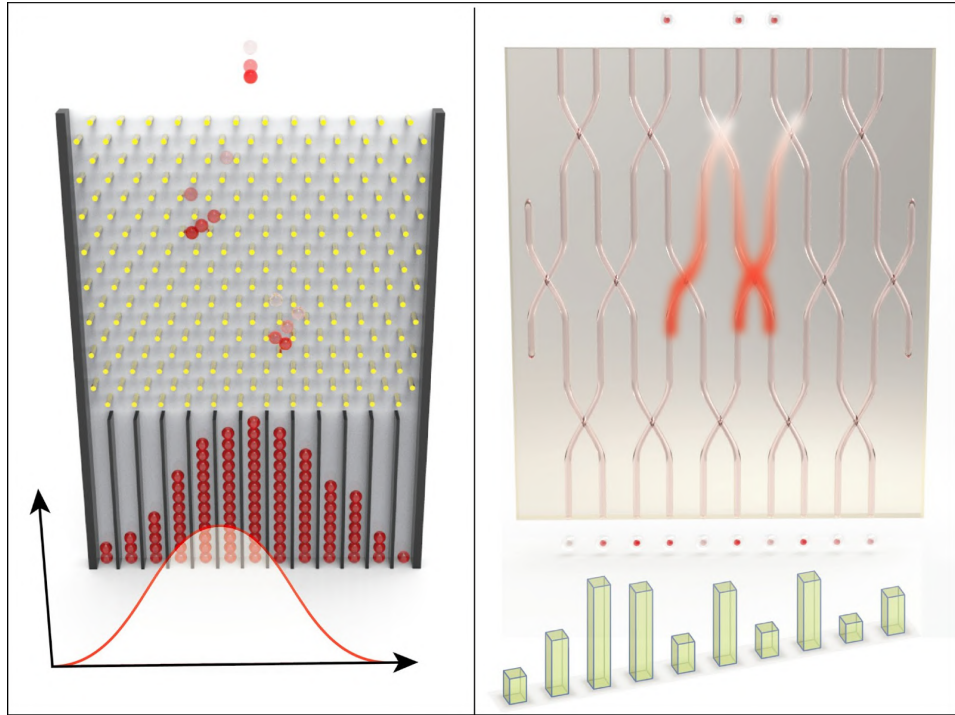


Figure 1.5 – Comparaison de la table de Galton et de son équivalent en optique intégrée pour le « boson sampling ». L'objectif consiste à évaluer la distribution de probabilité de sortie de particules quantiques dans chaque port de l'interféromètre (à droite) à l'instar de la table de Galton (à gauche) avec des particules classiques. Si dans le cas des particules classiques, le résultat (une loi binomiale) a pu être identifié par les mathématiciens, la contrepartie avec des particules quantique (les bosons) est pour l'instant très difficile avec un ordinateur classique.

ouvre la porte au parallélisme quantique dans les algorithmes d'évaluation de fonctions. En effet, si un qbit est dans une superposition d'états $\alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$ quelconque, deux qbits réunis sont quant à eux dans une superposition d'états $\alpha |00\rangle + \beta |01\rangle + \gamma |10\rangle + \delta |11\rangle$. Avec 10 qbits, on a 1024 états superposables, et avec n qbits, 2^n . Donc, quand un algorithme est appliqué à l'ensemble des qbits, il est, en quelque sorte, appliqué à 2^n états en même temps, ce qui équivaut à un « calcul parallèle sur 2^n données ». C'est pourquoi la puissance de calcul théorique d'un ordinateur quantique double à chaque fois qu'on lui adjoint un qbit. Une fonction $f(x)$ peut alors être évaluée simultanément pour plusieurs valeurs de x : c'est l'algorithme de Deutsch-Jozsa [21]. Attention, nous n'aurons pas accès aux différentes valeurs de $f(x)$ mais, grâce aux interférences quantiques, cela permet de répondre à certaines questions relatives au comportement de la fonction $f(x)$ comme sa parité ou sa monotonie. On peut également mentionner les avancées significatives qui eurent lieu en 1994 quand Peter Shor développa un algorithme reposant sur la manipulation d'états quantiques pour effectuer des opérations de factorisation [22], et

en 1997 avec l'algorithme de Grover pour la recherche d'éléments dans une liste [23], deux problèmes passant ainsi de la classe NP dans le monde classique à la classe P dans le monde quantique.

1.2.2 La simulation quantique

Un simulateur quantique est une classe restreinte d'ordinateur quantique spécifiquement développé pour simuler un autre système quantique auquel nous n'avons pas encore accès [7]. Les simulateurs quantiques permettent l'étude de systèmes quantiques difficiles à étudier en laboratoire et impossible à modéliser avec des supercalculateurs non quantiques. Les simulateurs et les ordinateurs sont donc des dispositifs similaires bien que la portée du simulateur soit plus restreinte. En effet, l'ordinateur quantique est dit « universel » puisqu'il doit être capable de conduire n'importe quel calcul en exploitant les ressources quantiques. Ainsi, le terme d'ordinateur est plus souvent utilisé pour décrire des calculs liés à des fonctions mathématiques plus abstraites, non liées à un système physique et utilisées en dehors de la méthode scientifique, tandis que le terme de simulateur fait référence à des fonctions que l'on peut interpréter comme faisant partie d'un modèle physique, faisant ainsi de la simulation une composante à part entière de la méthode scientifique.

Encore une fois prenons un exemple : L'atome d'hydrogène est constitué d'un proton et d'un électron liés par l'interaction Coulombienne. Trouver les différents niveaux d'énergie associés aux différents états propres de l'atome est un problème « classique » de physique quantique que nous savons résoudre et même simuler sur un simple ordinateur portable. C'est pour l'hélium constitué de 2 protons et 2 électrons liés que cela se complique. Les électrons sont des particules de spin $1/2$, c'est-à-dire que leur état quantique peut être associé à une projection du spin $+1/2$ (le spin pointe vers le haut $|\uparrow\rangle$) ou $-1/2$ (le spin pointe vers le bas $|\downarrow\rangle$) selon l'axe de quantification z . Autant l'hydrogène est simple à résoudre, autant l'hélium est le cauchemar des étudiants de Master puisque le principe d'indiscernabilité des électrons impose que l'état des deux électrons A et B doit être anti-symétrisé sous la forme d'une combinaison linéaire des deux⁶

$$\frac{|\uparrow\rangle_A |\downarrow\rangle_B - |\downarrow\rangle_A |\uparrow\rangle_B}{\sqrt{2}}$$

Cela implique que pour trouver l'état fondamental de l'hélium il nous faut non seulement allouer sur l'ordinateur 2^2 bits de mémoire mais calculer le résultat pour les combinaisons linéaires (superposition cohérente) de $|\uparrow\rangle_A, |\downarrow\rangle_B$ et $|\downarrow\rangle_A, |\uparrow\rangle_B$. Impossible donc de partager le travail avec d'autres ordinateurs. Fort heureusement, pour la plupart des atomes avec un grand nombre d'électrons, les choses sont plutôt simples à calculer (avec des supercalculateurs quand-même) puisque peu ou pas d'intrication rentre en jeu sauf... pour

6. qui n'est autre qu'un état intriqué...

le cas particulier de l'atome de thulium constitué de 69 électrons pour lequel l'intrication des électrons n'est plus négligeable (voir Figure 1.6).

Pour conduire mon calcul, je dois consacrer à ma simulation les ressources nécessaires pour pouvoir encoder l'état anti-symétrique qui est une superposition cohérente des états quantiques suivants :

[illegible]

Pour résumer, il y a donc 2^{69} états possibles qu'il faut traiter simultanément pour tenir compte de l'intrication correspondant à des superpositions cohérentes de certains de ces états. Nous apercevons maintenant où se situe le problème : 69 électrons donnent

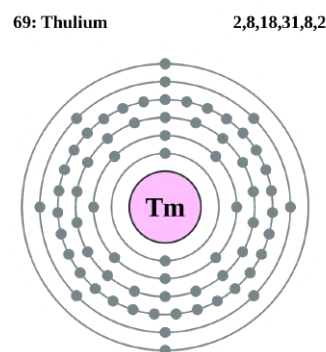


Figure 1.6 – Atome de thulium avec ses 69 électrons sur la couche externe.

naissance à 590295810358705651712 combinaisons possibles soit 600 milliards de milliards de milliards de bits (5×10^{20}) bien au-delà des capacités des ordinateurs actuels. Il faudrait en effet un milliard de disques durs de 1 To pour écrire mes états et démarrer le calcul, tandis que pour mon simulateur quantique, en omettant de prendre en compte les nombreux qbits supplémentaires pour assurer le calcul et la correction des erreurs, 69 qbits seraient logiquement suffisants.

Je n'ai pas choisi cet exemple par hasard, la limite des simulations classiques quelques années en arrière (2018) s'établissait à 49 qbits [24] et les récentes annonces d'ordinateurs quantiques déclarent disposer d'un millier de qbits physiques pour effectuer des simulations ou calculs [25, 26] en offrant des solutions viables pour manipuler jusqu'à 100 qbits logiques. À travers ces chiffres très proches, nous pouvons sentir que nous sommes au milieu d'une révolution qui est maintenant engagée et qui aboutira d'une façon ou d'une autre. Quel est donc l'intérêt économique de ce genre de simulation à grand nombre de particules à spin ? Par exemple, pour trouver des matériaux supraconducteur à haute température. Les physiciens de la matière condensée utilisent le terme « frustré » pour décrire un type d'aimant dans lequel les spins des électrons ne parviennent pas à s'aligner dans un ordre magnétique stable. Dans les aimants parfaitement frustrés, connus sous le nom de « liquides de spin » [27], le magnétisme désordonné persiste même à très basse température, conséquence spécifique de l'intrication de leur état fondamental. Les propriétés uniques de ces matériaux sont explorées pour le développement de matériaux supraconducteurs à haute température [28, 29]. Par ailleurs, ce type de simulateur pourrait nous aider à simuler de grandes molécules complexes et découvrir de nouveaux catalyseurs pour la capture du carbone émis par l'exploitation des énergies fossiles⁷ ou la fixation biologique de l'azote pour la fabrication d'engrais, moins chers et plus efficaces que les modèles actuels [30].

1.2.3 La métrologie quantique

D'une façon générale, il est impossible de parler de métrologie sans parler d'interférométrie, tant elle est ancrée dans l'art d'extraire des grandeurs physiques des systèmes à mesurer. L'interférométrie est une technique optique inventée à la fin du *XIX^e* par Ch. Fabry et A. Pérot qui permet de mesurer des déplacements, des épaisseurs ou des indices de réfraction avec une précision qui va bien au-delà d'une mesure directe à l'aide d'un étalon. En recombinaison de deux composantes de l'amplitude d'une onde électromagnétique dont l'une sert de sonde et l'autre de référence, nous obtenons un phénomène d'interférence qui nous permet d'extraire des informations avec une précision de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde du champ optique utilisé. Nous sommes en train de parler de mesure dont la précision est de l'ordre de la centaine de nanomètres et tout l'art de ce domaine de recherche consiste à trouver des configurations d'interféromètre

7. Total a officiellement annoncé en 2020 vouloir accélérer le développement des technologies « Capture, utilisation et stockage du carbone » indispensables pour atteindre la neutralité carbone en 2050.

pour lesquelles la sensibilité est accrue par un facteur multiplicatif, tel l'interféromètre LIGO et ses bras de plusieurs km pour capter une infime variation du champ gravitationnel. Pour autant, le travail de recherche en métrologie ne se résume pas à cela puisque qu'un tel procédé est généralement accompagné d'erreurs statistiques qu'il faut traiter correctement.

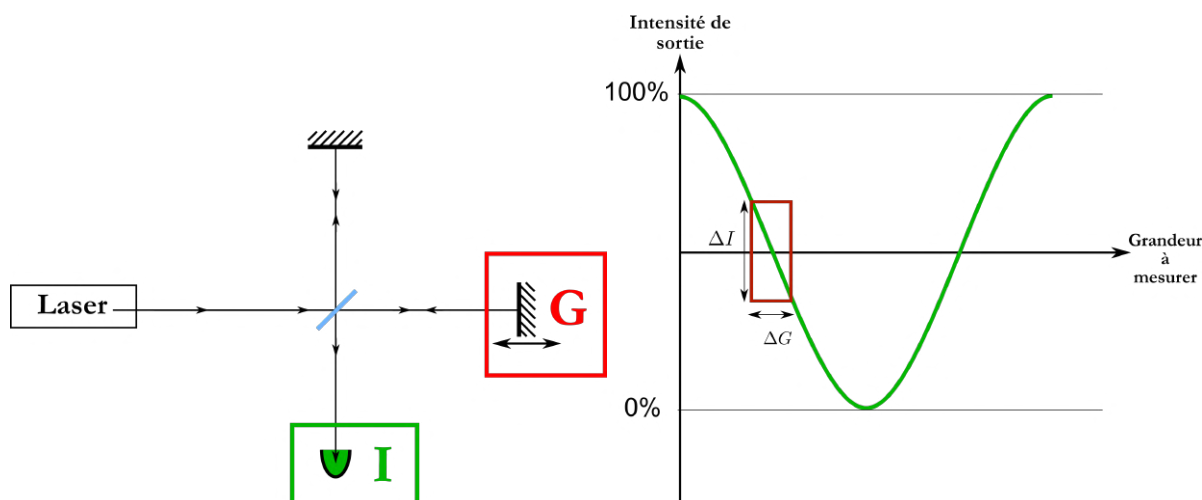


Figure 1.7 – Métrologie classique à base d'interférométrie laser. La grandeur G est « mécaniquement » liée à la position du miroir et conduit à des interférences constructives ou destructives visibles sur la courbe d'intensité de sortie à droite de la figure. La sensibilité du montage est indiquée par le rectangle rouge qui lie la variation d'intensité ΔI en fonction de la variation ΔG de la grandeur. D'un point de vue quantique, cette configuration exploite la superposition quantique d'une particule dans chaque bras et l'expérience est répétée N fois.

Nous prendrons pour cela l'exemple d'un interféromètre de Michelson que nous utilisons pour mesurer une grandeur G à l'aide d'un champ laser d'une grande stabilité en intensité. Nous obtenons un interférogramme comme présenté sur la Figure 1.7 qui lie la valeur de l'intensité I en sortie avec la valeur de G . Ce qui intéresse en général les métrologistes, c'est ΔI la variation d'intensité en fonction de ΔG la variation de G identifiée par le rectangle rouge.

La physique quantique apporte 3 concepts importants à ce domaine :

- **Le premier** est que l'interférométrie n'est plus exclusivement réservée aux ondes électromagnétiques et que les particules massives peuvent se comporter comme des ondes dont la longueur d'onde effective (longueur d'onde de De Broglie $\lambda = \frac{h}{mv}$) peut être plusieurs ordres de grandeurs plus courte. C'est par exemple l'axe de recherche suivi à l'observatoire de Paris pour le développement de gravimètres [31] et horloges [32] à atomes froids dont la sensibilité et la précision sont sans égales.
- **Le second** est que toute variation de I n'est pas forcément liée à une variation

de G , aussi stable que puisse être l'intensité d'entrée du laser. Nous savons qu'il existe une limite fondamentale liée au « shot noise » [33] du laser qui implique une fluctuation de l'intensité en $\Delta I = \sqrt{N} \times \hbar\omega$ avec N le nombre moyen de photons contenus dans le champ optique. Il en résulte une erreur relative que nous ne pouvons pas annuler en $\frac{\Delta I}{I} = \frac{1}{\sqrt{N}}$. Dans la description quantique du champ électromagnétique, les quadratures (amplitude et phases) sont reliées par une relation de dispersion fondamentale $\Delta X_1 \Delta X_2 \geq \hbar/2$. Il est toutefois possible de mettre en forme cette relation afin qu'une des observables ait une variance réduite par rapport à l'autre comme présenté sur la Figure 1.8. Il est alors possible de faire certaines mesures dont la résolution dépasse la limite standard du shot noise. Un exemple notable que nous pouvons souligner est la phase de développement actuelle du projet VIRGO qui consiste à injecter de la lumière comprimée afin de permettre la détection d'ondes gravitationnelles [34] avec une résolution allant au delà du *shot-noise* pour cet interféromètre de Michelson géant [35].

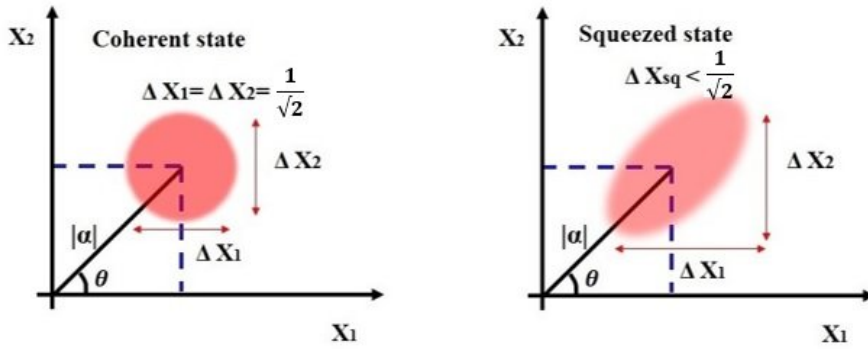


Figure 1.8 – La description quantique du champ électromagnétique met en exergue une relation de dispersion entre l'amplitude (ΔX_1) et la phase (ΔX_2) qui limite la précision absolue d'une mesure métrologique à l'aide d'un signal laser. Il est toutefois possible de créer des états comprimés de la lumière dont la relation de dispersion n'est pas symétrique et pour lesquels une des quadratures est réduite vis à vis de l'autre.

- **Le troisième** est que l'utilisation d'un champ cohérent s'apparente à établir la moyenne des résultats de N mesures indépendantes (chaque photon du mode laser interagit avec lui même indépendamment des autres) et converge vers une distribution gaussienne avec une distribution standard $\frac{\sqrt{N}}{N}$, ce qui correspond par conséquent à une erreur en $\frac{1}{\sqrt{N}}$, avec N le nombre total de photons dans le mode optique si nous utilisons un laser (ou le nombre de fois que l'on répète la mesure avec un seul photon). Il est coutume de la nommer « limite quantique standard », ou « shot-noise » en optique quantique. Autrement dit, la présence d'une erreur statistique en $\frac{1}{\sqrt{N}}$ suppose que le procédé de mesure s'est effectué en présence

de corrélations « classiques » entre les différents photons, qui ne sont généralement...pas corrélés. En métrologie classique, c'est donc l'absence de corrélations entre les photons (dans notre exemple) qui empêche de descendre en dessous de la limite quantique standard [9]. C'est précisément ici que la photonique quantique entre en jeu. L'idée consiste à utiliser N particules qui présentent des corrélations quantiques, autrement dit N particules intriquées. C'est donc dans cet esprit que sont apparus les états intriqués dit « $N00N$ » correspondant à des états à N particules dont les applications pour la métrologie optique sont admirablement présentées dans la référence [36]. Il s'agit d'états qui s'écrivent

$$\frac{|0, N\rangle + |N, 0\rangle}{\sqrt{2}}$$

et qui correspondent à une superposition cohérente d'un état fortement corrélé de N particules dans un mode, tandis que l'autre est vide et vice-versa (voir Figure 1.9). Pour un tel ensemble de N photons corrélés, on atteint la limite ultime, connue sous le nom de limite de Heisenberg, qui ne permet pas de descendre en dessous d'une erreur statistique en $\frac{1}{N}$. La métrologie quantique a donc pour but d'étudier cette limite et les stratégies qui permettent de l'atteindre [37, 38, 39, 40, 41, 42].

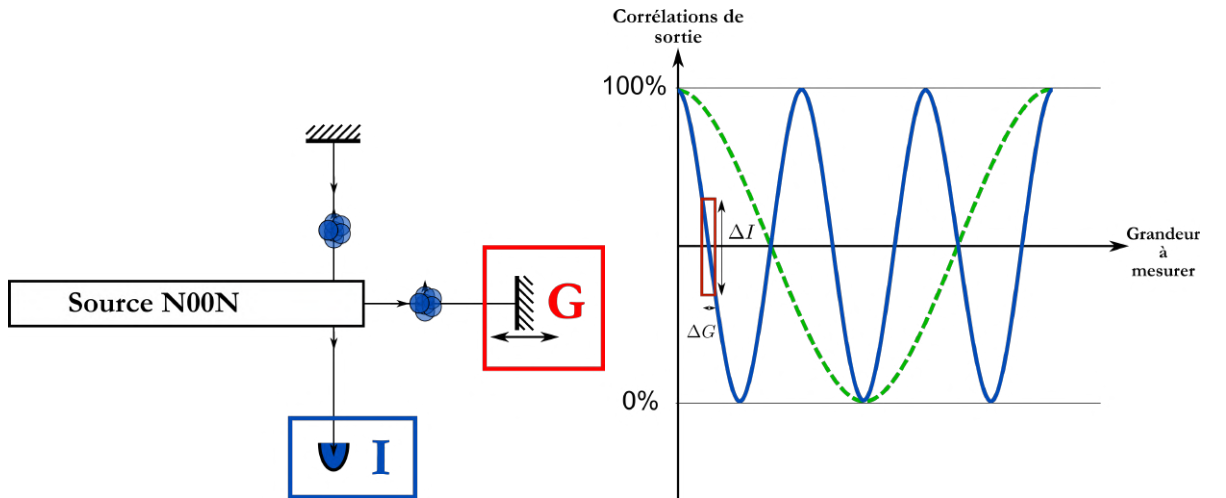


Figure 1.9 – Métrologie quantique à base d'interférométrie à $N = 2$ particules. En comparaison avec la Figure 1.7, dont l'interférogramme est représentée en vert, cette configuration exploite la superposition quantique de 2 particules intriquées $\frac{|0,2\rangle + |2,0\rangle}{\sqrt{2}}$ dans chaque bras. La sensibilité qui est indiquée par le rectangle rouge sur l'interférogramme en bleu est liée à la périodicité des franges d'interférences qui est $N = 2$ fois plus grande. Nous atteignons la limite de Heisenberg dans ce cas présent.

1.2.4 La communication quantique

Notre société a de plus en plus besoin de traiter et de communiquer des données. Le chiffrement des données de communication est un levier majeur de la confiance que nous accordons au numérique, un rempart contre l'espionnage et les cyberattaques. C'est un élément crucial de notre sécurité en ligne et de la confidentialité sur internet. Malheureusement, la sécurité de la cryptographie conventionnelle repose souvent sur de simples hypothèses de calcul. Par exemple, la sécurité du système RSA [17] – le système de cryptage à clef publique le plus répandu présenté à la section 1.2.1 – est basée sur la difficulté présumée que représente la décomposition d'un grand nombre en ses facteurs premiers. Or, parmi les algorithmes quantiques présentés précédemment, nous avons vu qu'un processeur quantique pourrait permettre, via l'algorithme de Shor [22], de factoriser des grands nombres en un temps polynomial à la taille de ces derniers, rendant ainsi la cryptographie conventionnelle vulnérable aux progrès technologiques. Il est important de comprendre que la fragilité des cryptosystèmes classiques actuels ne constitue pas vraiment une menace au moment où nous écrivons ces lignes, mais une menace plus sérieuse et réaliste pour l'avenir. Sans même anticiper l'avènement de l'informatique quantique, un espion peut intercepter des cryptogrammes indéchiffrables aujourd'hui, les stocker et attendre leur déchiffrement lorsqu'un ordinateur quantique suffisamment puissant sera technologiquement disponible (ou lorsqu'un nouvel algorithme classique sera découvert). Cela signifie que la confidentialité des messages peut avoir une durée de vie très limitée et que nous devrions commencer à migrer vers un chiffrement à sécurité quantique dès que possible.

En effet, la physique quantique peut permettre de rendre obsolètes les techniques de cryptographie actuelles, mais elle peut également permettre de les dépasser. L'établissement quantique de clefs secrètes (*Quantum Key distribution* - QKD), l'application la plus connue des communications quantiques, promet d'atteindre le Saint Graal de la cryptographie, à savoir l'établissement de communication avec un niveau de sécurité inconditionnelle. On parle de sécurité inconditionnelle lorsque l'espion (Eve) n'est pas limité par des hypothèses de calcul, mais seulement par les lois de la physique. La cryptographie quantique s'appuie sur le principe d'incertitude de Heisenberg formulé en 1927 [43] et le théorème de non-clonage décrit par Wootters et Zurek en 1982 [44]. En résumé, nous ne pouvons pas mesurer les caractéristiques d'un système quantique sans l'altérer et nous ne pouvons pas avoir accès à toutes ses propriétés. Le théorème de non-clonage démontre quant à lui qu'il est impossible de créer une copie parfaite d'un état quantique inconnu et arbitraire. L'impossibilité d'établir une copie parfaite oblige ainsi un espion à effectuer une mesure sur le système original et laisser une trace de son méfait.

Nous ne chercherons pas à détailler le principe de la distribution quantique de clefs puisqu'elle est maintenant accessible dans de nombreuses thèses ou articles de vulgarisation. À ce titre, deux excellents articles de revue, très complets, sont disponibles en ligne [46, 47] et nous nous contenterons de rappeler que les réalisations expérimentales

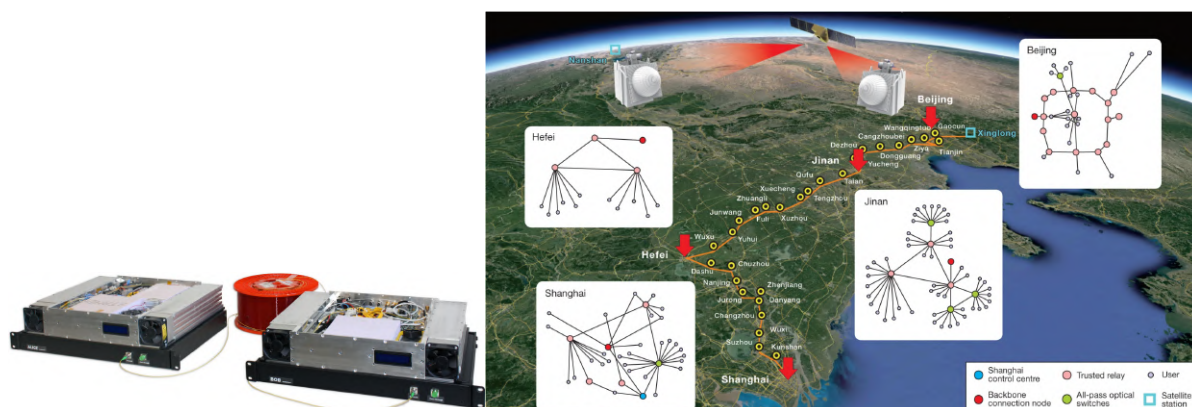


Figure 1.10 – À gauche : un système de QKD compact et autonome capable d'établir des clefs secrètes sur 307 km de fibre optique grâce au protocole Coherent One Way (COW) [45]. À droite : le réseau quantique chinois composé d'une liaison en fibre optique sur 2000 km (ligne orange) et de deux liaisons sol-satellite qui relient Xinglong et Nanshan (carrés bleus), séparés par 2600 km.

de dispositifs de QKD ont beaucoup progressé au cours de ces deux dernières décennies. En 2002, le record de distance pour la transmission quantique de clefs secrètes était de 67 km, entre Genève et Lausanne [48]. Suite à plusieurs évolutions technologiques, ce record est passé, toujours à Genève, en 2018 à 421 km, preuve de la croissance très rapide de ce champ d'applications [49], puis jusqu'à 4600 km plus récemment en Chine avec l'avènement des liens satellitaires [50] (voir Figure 1.10). Par ailleurs, l'apparition de nouveaux protocoles de type « twin-field » a permis d'atteindre des distances en lien terrestre direct jusqu'à 1000 km [51], toujours en Chine.

Outre l'établissement quantique de clefs secrètes, de nombreuses autres applications à l'échange d'états quantiques peuvent être citées, telles que : le calcul distribué sécurisé quantique (*secure quantum distributed computing*) [52], le pile ou face quantique (*quantum coin flipping*) [53], les preuves à divulgation nulle de connaissance (*quantum zero-knowledge proof*) [54], le transfert quantique inconscient (*quantum oblivious transfer*) [55], ou encore les gages quantiques (*quantum bit-commitment*) [56]. Au final, toutes ces applications rentrent sous l'ombre de l'internet quantique, c'est-à-dire un réseau qui permettra aux dispositifs quantiques d'échanger des informations encodées dans des états quantiques (ordinateurs, capteurs, stockage, etc. ...)

1.3 Les communications quantiques déployées en champ réel

1.3.1 Enjeux et défis

Nos laboratoires sont des bulles privilégiées, à l'abri desquelles de nouveaux protocoles tels que la distribution quantique de clefs ou la téléportation quantique d'états, ont pu émerger depuis une trentaine d'années. Toutefois, ces protocoles n'ont pas vocation à y rester confinés. Les chercheuses et les chercheurs 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, et capables d'autodiagnostiquer des 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.

Déployer les dispositifs de communications quantiques hors du laboratoire vise également à répondre à de nombreuses questions ouvertes comme :

- Quelle est la distance maximale atteignable, compte tenu des réseaux de fibre déjà déployés ? À distance et topologie données, faut-il préférer un lien fibré ou un lien satellite ?
- Quel est le protocole le plus adapté en fonction de la zone à couvrir ? Intra-urbaine, métropolitaine, nationale, . . .
- Quelle intégration est possible dans les réseaux de communication classique déjà déployés ? Quel niveau de cohabitation est envisageable ? Quels sont les besoins additionnels en termes de communication classique entre les utilisateurs ?
- Quels sont les besoins en termes de débit de clef secrète ? Quel degré de coexistence/intégration avec les protocoles de chiffrements actuels est envisageable ?
- Comment évaluer la sécurité dans son ensemble, en tenant compte que la faille de sécurité puisse se situer aux interfaces avec le système quantique ? Comment évaluer la sécurité des nœuds dits « de confiance » ?
- Quel sont les besoins en termes de déploiement de nouvelles fibres ? Quelle topologie adopter ?
- Et toutes ces questions sont à ajuster en fonction des applications et cas d'usages visés

Pour pouvoir répondre à ces questions, il a fallu opérer une forte montée en maturité technologique des dispositifs quantiques afin de rendre les développements en laboratoire résistants à des environnements extérieurs « hostiles ». À ce titre, la photonique intégrée, qui a été la clef des télécommunications modernes, joue également le rôle de « technologie habilitante » pour les communications quantiques. Elle a considérablement stimulé la photonique quantique expérimentale en lui permettant de dépasser la preuve de principe en laboratoire sous la forme de sources de photons massives, gourmandes en

énergie et d'interféromètres optiques construits à partir de composants massifs boulonnés à des tables optiques, vers des prototypes à faible consommation et encombrement, intrinsèquement stables et utilisables en dehors du laboratoire. L'effet levier de l'optique intégrée/guidée réside essentiellement dans l'amélioration de l'efficacité des interactions non linéaires optiques et électro-optiques, mais aussi dans la possibilité de combiner plusieurs fonctions sur une seule puce, ce qui simplifie considérablement la réalisation et l'utilisation de circuits (électro-)optiques quantiques interférométriques.

Au travers les nombreux travaux de communication en champ réel, qui seront présentés à la section 1.3.2, nous avons maintenant une idée assez précise de ce qu'implique la notion de « champ réel » : environnements de travail pas forcément (voire pas du tout) adaptés à des expériences d'optique (salle serveur, local technique, salle d'expérience partagée, coupole d'observatoire ...) ⁸. Dès lors, sans une forte compacité et une grande résilience aux perturbations extérieures, il est inconcevable de sortir du laboratoire. L'idée est résumée graphiquement sur la Figure 1.11 : l'exploitation en champ réel des technologies quantiques n'aurait pas pu se faire avec le montage de gauche qui s'étale sur une table optique d'environ 1 m² et requiert des conditions de fonctionnement difficilement compatibles avec le « monde réel ». Il aura fallu un effort de développement technologique pour aboutir à des composants compacts dont l'encombrement est de quelques cm² tels que présentés sur la figure de droite. Dans cette course, plusieurs plateformes se démarquent : le niobate de lithium de part sa maturité technologique mais d'autres jouent de leurs atouts spécifiques pour occuper l'espace. Parmi les multiples plates-formes disponibles [59], on peut citer le silicium [60] de part sa densité d'intégration inégalée ou les semi-conducteurs III-V [61, 62, 63] pour leur technologie de fabrication mature, la possibilité d'intégrer des lasers et des détecteurs supraconducteurs pour la détection de photons sur puce.

Défi #1

Évidemment, le développement de nouvelles sources de lumière quantique offrant de nouvelles fonctionnalités et d'analyseurs d'états quantiques innovants sont les premières choses qui nous viennent à l'esprit.

Défi #2

Mais très vite, des défis liés à la synchronisation temporelle des utilisateurs distants ainsi que la stabilisation relative de leurs systèmes d'analyse des états quantiques surgissent. Des besoins nouveaux auxquels il faut trouver des solutions encore une fois !

Par exemple, pour tout partage d'état quantique, la synchronisation temporelle est l'un des facteurs les plus cruciaux, car elle permet aux utilisateurs (Alice et Bob) d'as-

8. Il n'est d'ailleurs pas rare de lire des papiers expérimentaux de communication quantique en champ réel qui jouent la carte de la facilité en faisant subir un aller-retour aux photons pour pouvoir travailler dans des conditions simplifiées [57, 58].

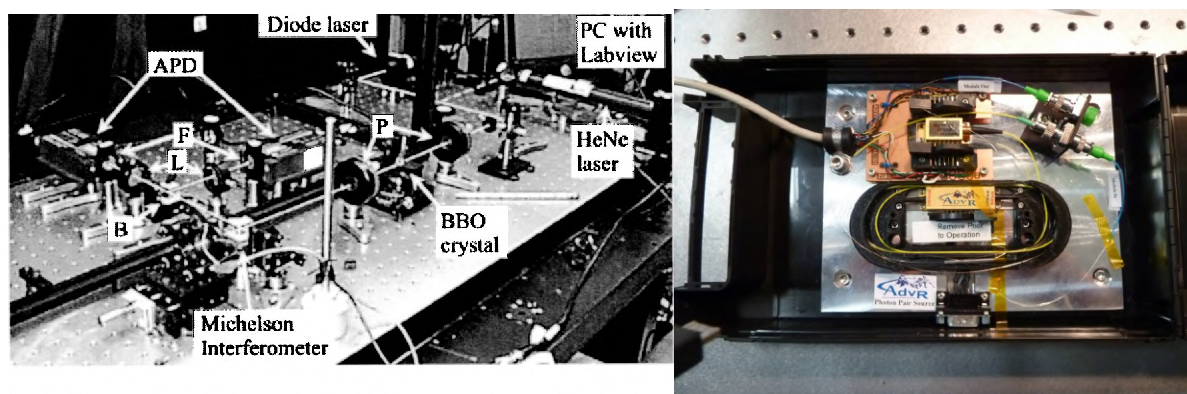


Figure 1.11 – Deux dispositifs équivalents mais deux approches différentes. Il aura fallu la synergie de l’optique intégrée et de l’optique quantique pour passer d’une expérience de génération de paires de photons de laboratoire (emprise au sol de $\sim 1\text{ m}^2$) à un dispositif, transportable, qu’il est possible d’installer presque n’importe où (emprise au sol de quelques cm^2). Photo de droite « empruntée » de la compagnie AdvR.inc.

socier à chaque détection une heure exacte, ce qui permet d’identifier et reconstruire les corrélations temporelles entre Alice et Bob. En pratique, les corrélations temporelles sont mesurées à l’aide d’un dispositif de datation de haute 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. 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 , c’est-à-dire environ 1 ns toutes les secondes. La même horloge étant utilisée pour dater tous les évènements, sa stabilité importe peu puisque les corrélations font intervenir les intervalles de temps relatifs entre des évènements 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 ce service à nos téléphones, 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 l’un des axes de recherche importants du réseau de recherche en métrologie du temps FIRST-TF⁹.

Une synchronisation précise peut augmenter de manière significative le rapport signal/bruit et, compte tenu des performances actuelles de la gigue temporelle des détecteurs de photons uniques, une précision de quelques dizaines de picosecondes est aujourd’hui nécessaire [64, 65, 66]. Les échelles de temps de chaque station doivent être

9. <https://first-tf.fr/>

synchronisées ou syntonisées¹⁰.

Pour des liens de QKD élémentaires, i.e. à deux utilisateurs, la syntonisation est suffisante, tandis que la synchronisation sera nécessaire pour les réseaux quantiques avancés à $N \geq 3$ utilisateurs. Quelle que soit l'application visée, la synchronisation peut être mise en œuvre par un système mondial de navigation par satellite (GNSS), au détriment d'une faible précision à courte échelle de temps [67], ou par la transmission d'impulsions lumineuses intenses, soit dans une fibre dédiée [68, 69] (technologie White Rabbit), soit dans le canal quantique à une longueur d'onde différente [70], pour une grande précision à courte échelle de temps. Pour un déploiement réel sur le terrain, les solutions précédentes pourraient ne pas être compatibles avec les scénarios commerciaux, car le multiplexage des longueurs d'onde ajoutera du bruit optique et l'exploitation d'une fibre dédiée pour la synchronisation est trop coûteuse pour être sérieusement envisagée.

Défi #3

La mesure des corrélations sur les observables intriquées requiert des mesures interférométriques corrélées qui imposent une stabilisation relative des deux interféromètres utilisés. À titre d'exemple, pour les corrélations en énergie, nous mesurons la somme des énergies des deux photons 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 $\frac{\lambda}{100}$ 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 REFIMEVE¹¹ qui vise à assurer le transfert d'une fréquence optique ultra-stable sur longue distance. Ce genre de considération est identique pour la stabilisation relative des analyseurs de qbits en polarisation [57].

Défi #4

Un autre point important à mettre en avant est celui du flux de données échangées au cours d'une expérience de distribution quantique de clefs. Un calcul rapide montre qu'une dizaine de millions de détections de photons dont la date (à la picoseconde près) et le numéro d'identification sont codés sur 64 bits requiert un débit d'information d'environ 640 Mbit/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 des bases de mesure, d'estimation et de correction des erreurs qui sont très

10. La synchronisation est définie par le partage de la fréquence et de la phase (c'est-à-dire que deux horloges font tic-tac à la même fréquence et donnent exactement la même date) alors que la syntonisation ne prend en compte que le partage de la fréquence (c'est-à-dire que deux horloges font tic-tac à la même fréquence mais peuvent avoir un décalage fixe).

11. <https://www.refimeve.fr/index.php/fr/>

gourmandes en données. Il y a donc un fort besoin d'amélioration des algorithmes de correction d'erreurs et d'amplification de sécurité en termes d'efficacité et de consommation de ressources.

Défi #5

Enfin, un dernier point tout aussi important se situe au niveau l'intégration de la QKD à l'échelle nationale. Pour aussi parfait que peut être le protocole, les réseaux physiques de communications quantiques ne couvriront certainement pas 100% du territoire français ou tout au moins ne seront pas disponibles 100% du temps. A titre d'exemple un lien Nice-Paris ne sera certainement pas constitué de 100% de brins opérant la QKD ou en cas de forte congestion de la demande, des liens alternatifs devront être disponibles. C'est donc tout le travail des chercheurs en cyber-sécurité et en déploiement des réseaux que de trouver des topologies de réseaux résilientes ou mixant des liens QKD avec des liens « post-quantique » avec une transparence absolue pour les utilisateurs !

1.3.2 État de l'art

Pour conclure ce chapitre introductif, nous allons établir une image à l'instant t du paysage mondial des implémentations de QKD associées à quelques remarques pour mettre en avant leurs originalités et leurs limites. Nous discuterons également des solutions de synchronisation et de stabilisation mises en œuvre quand cela sera pertinent.

Très longue distance – les réseaux déployés en Chine

Il existe à ce jour deux réalisations d'expériences de QKD couvrant des distances dépassant largement les 1000 km. Elles exploitent chacune l'une des deux approches actuellement disponibles pour déployer de la QKD sur une telle distance : la QKD par satellite et l'utilisation de nœuds de confiance (trusted nodes).

Historiquement, la première réalisation de ce type a été réalisée en 2017, lors d'un partage quantique de clefs par satellite entre Graz en Autriche et Xinglong en Chine, pour une distance totale de 7600 km, formant ainsi un lien intercontinental [71]. À ce lien, s'ajoute un troisième utilisateur, situé à 2500 km de Xinglong, à Nanshan en Chine, formant ainsi un réseau de trois utilisateurs avec nœuds de confiance, comme montré en Figure 1.12. Dans ce réseau, chaque utilisateur ne communique directement qu'avec le satellite, exploitant le protocole decoy BB84 [72]. Afin de partager une clef identique entre deux stations (Alice et Bob), il est donc nécessaire que le satellite envoie à chaque station le XOR de leurs clefs respectives. Ce dernier doit donc agir comme un nœud de confiance afin de permettre le chiffrement des données entre deux stations au sol. Cette implémentation est à ce jour l'expérience de QKD spatiale la plus avancée et le partage quantique de clefs sur la plus grande distance jamais réalisé. Elle montre la faisabilité de

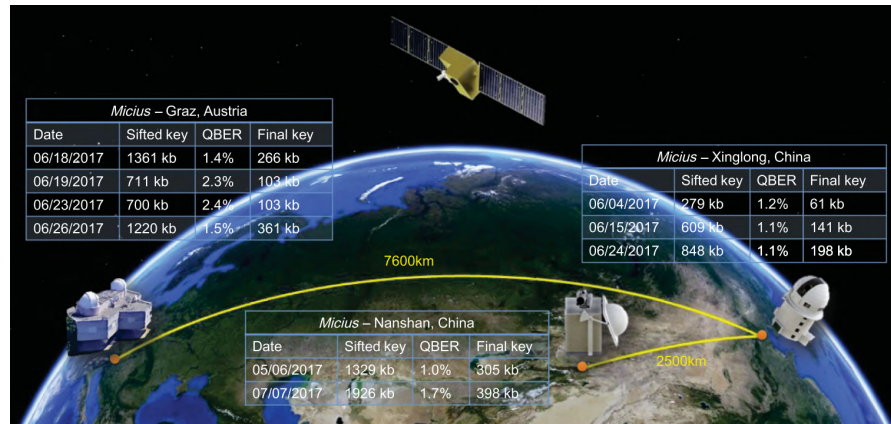


Figure 1.12 – Représentation des trois stations au sol pouvant partager des clés via le satellite Micius. Chaque station partage plusieurs centaines de kilobits de clés par protocole decoy BB84 avec le satellite lorsqu'il passe à portée, qui permet ensuite une communication chiffrée entre ces trois lieux, en agissant comme un nœud de confiance (trusted node).

la QKD par satellite et ouvre la porte à l'implémentation de canaux de communications sécurisés intercontinentaux. De plus, une telle expérience peut constituer un premier pas vers de la QKD satellite vers satellite qui pourrait permettre de partager des clés entre n'importe quels points sur terre dotés d'un télescope. Cependant, cette expérience montre aussi les limites, technologiques et théoriques, de la QKD par satellite. En effet, chaque entrée sur la Figure 1.12 correspond à un passage du satellite au-dessus de la station au sol, permettant un partage de clés pendant environ 300 secondes, pendant lesquelles les variations de pertes de transmission et les variations de fréquence apparente des photons (par effet Doppler) sont des défis à surmonter à l'avenir [73].

Le réseau de QKD au sol couvrant actuellement la plus grande distance totale et reliant le plus de nœuds est localisé dans l'est de la Chine. Il s'étend sur ~ 2000 km de fibres optiques, et relie 31 nœuds, et quatre sous-réseaux urbains entre eux [74], pour un total de plus de 150 utilisateurs, comme montré en Figure 1.13. Il est aujourd'hui le seul réseau fibré à dépasser les 1000 km et est relié à l'une des stations au sol du réseau satellite mentionnée plus haut. Il exploite le protocole de QKD decoy BB84, qui peut normalement difficilement lier deux utilisateurs à plus de 500 km de fibre avec les technologies actuelles. Afin d'atteindre une distance de 2000 km, 31 nœuds sont placés le long du réseau et agissent comme des nœuds de confiance, créant ainsi un réseau constitué de différents liens d'une longueur moyenne de 63,8 km qui, mis bout à bout permettent de partager des clés entre des utilisateurs à grande distance. Par ailleurs, les réseaux urbains déployés, détaillés en Figure 1.13, ont des topologies simples (majoritairement des configurations en étoiles) qui requièrent presque systématiquement l'utilisation de nœuds de confiance pour partager des clés entre deux utilisateurs. Ces deux aspects sont les principales limites de l'exploitation du protocole BB84 et rendent très complexe

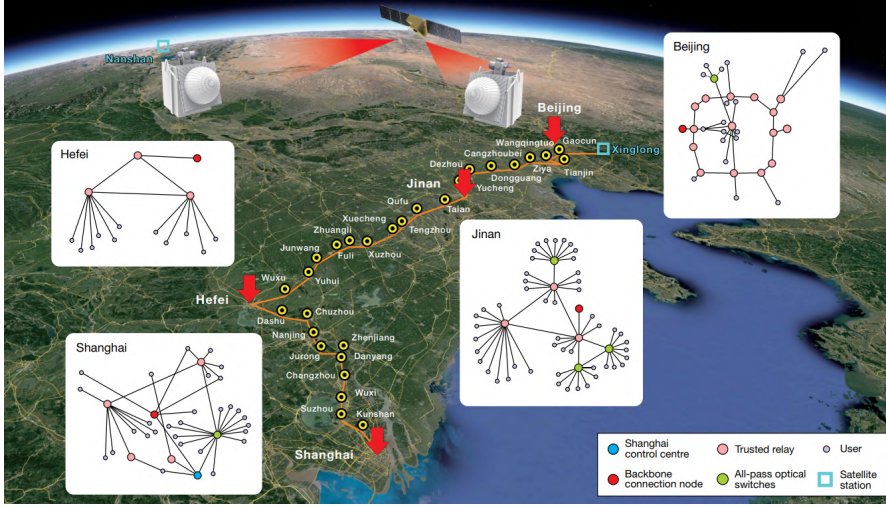


Figure 1.13 – Lien de QKD basé sur decoy BB84 déployé dans l’est de la Chine sur plus de 2000 km de fibre. Chaque point jaune représente un trusted node pour les liens entre les villes et les flèches rouges représentent les villes dans lesquelles des réseaux de différentes topologies sont déployés.

la création de réseaux densément connectés avec ce protocole.

Dans les deux démonstrations discutées, la synchronisation temporelle est assurée via un canal dédié. Pour les réseaux au sol, il s’agit d’une fibre dédiée qui distribue un signal de synchronisation optique tandis que, pour les liens en espace libre, la synchronisation des deux stations terrestres a été réalisée à l’aide d’un laser pulsé à 100 kHz, envoyé depuis le satellite et parfaitement aligné avec les photons. En particulier pour les liens vers les satellites, leur mouvement par rapport au sol induit une dérive du temps d’arrivée et de la rotation de la polarisation observée par les récepteurs qu’il convient de corriger. C’est une approche 100% classique qui a été adoptée avec des lames d’ondes motorisées et une fenêtre d’analyse de 2,5 ns qui permet d’assouplir la contrainte de synchronisation au détriment du rapport signal à bruit.

Bien qu’il ne s’agisse pas à proprement parlé d’une réalisation déployée, mais d’une démonstration en laboratoire (voir Figure 1.14) qui utilise des fibres très particulières présentant des pertes très basses (en moyenne inférieure à 0.157 dB/km) et des prototypes de détecteurs très bas bruit (0,02 Hz de bruit) et très haute efficacité ($\sim 94\%$), les résultats sont suffisamment saisissants pour les citer ici. L’exploitation du protocole twin-field [75] a permis l’implémentation du premier lien fibré de 1000 km sans répéteurs ou trusted nodes [76] en 2023. Cette expérience montre la limite de pertes tolérables par ce protocole, avec un taux de clefs asymptotiques de 0,0034 bps, justifiant ainsi le besoin d’exploiter d’autres méthodes pour créer des liens de QKD sur des plus longues

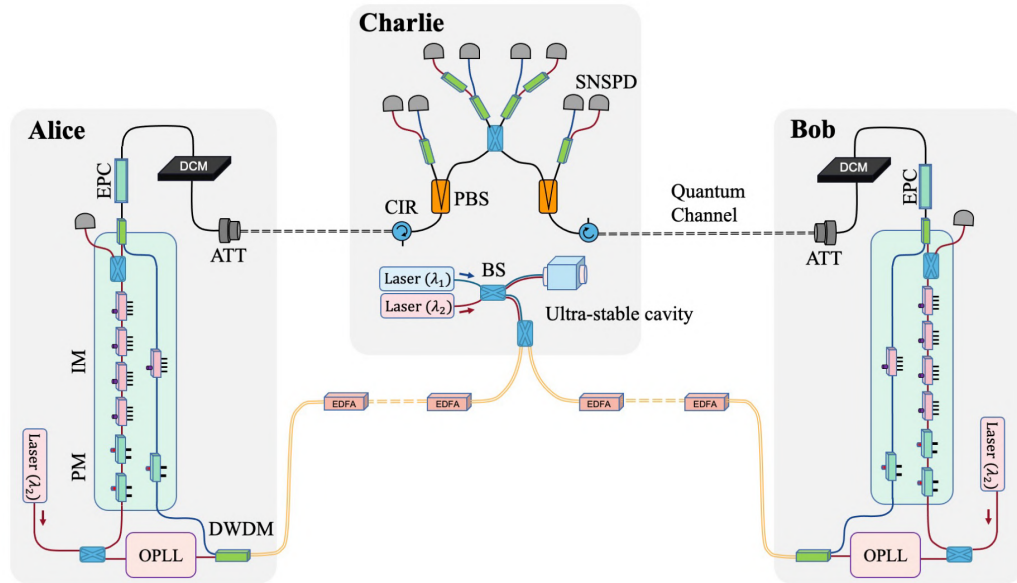


Figure 1.14 – Implémentation en laboratoire du protocole twin-field QKD qui utilise des fibres à très faibles pertes, des détecteurs à très haute efficacité et très bas bruit (0,02 Hz de bruit) et très haute efficacité pour afficher les limites maximales de la QKD point à point en termes de distance : 1000 km.

distances, comme la QKD par satellite, les trusted nodes ou le développement de répéteurs quantiques.

Ici la notion de synchronisation temporelle n'a pas de sens puisque l'expérience n'est pas déployée mais la stabilisation d'un interféromètre géant de 1000 km est un tour de force qu'il faut saluer !

Pour conclure cette section sur les réalisations chinoises, le programme QUESS (Quantum Experiments at Space Scale) est un programme scientifique vaste dont l'objectif est de tester des télécommunications entre un satellite et des installations au sol. Un très bonne revue des travaux (très complet) est disponible dans la référence [77].

QKD longue distance – les réseaux déployés en Europe

Historiquement, l'expérience réalisée en 2007 sur les îles Canaries entre Palma et Tenerife de la Figure 1.15 fait figure de pionnière. L'idée était d'explorer d'autre pistes que le partage de clef par fibre optique mais surtout de démontrer les premiers tests de liens vers les satellites. Cette expérience de QKD a été réalisée entre deux îles de l'archipel des Canaries via un télescope de la station d'observation de Tenerife, permettant un partage de clefs en espace libre sur 144 km (limité par la courbure de la terre), exploitant

le protocole BBM92 [78].

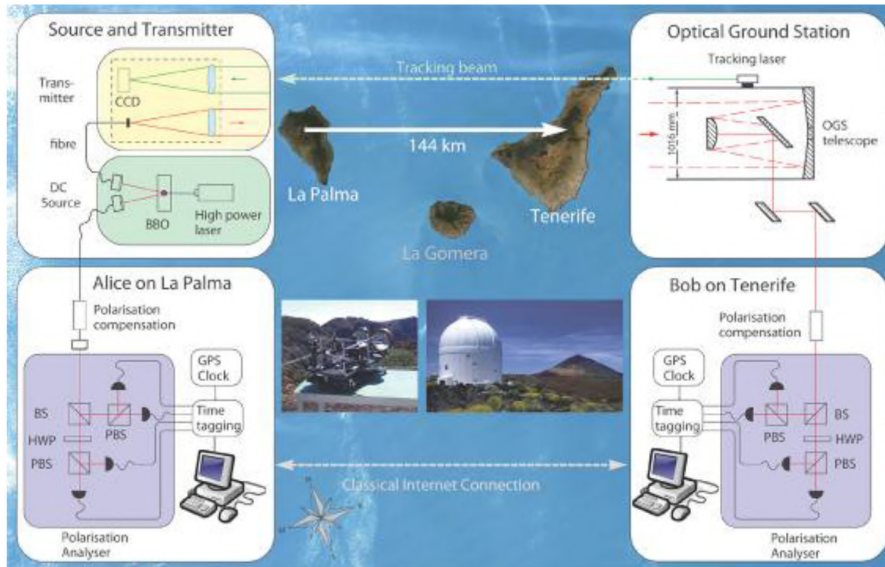


Figure 1.15 – Une expérience de QKD a été réalisée entre deux îles de l’archipel des Canaries via un télescopes de la station d’observation de Tenerife, permettant un partage de clefs en espace libre sur 144 km, exploitant le protocole BBM92 [78]. Cette réalisation montre un taux de clefs secrètes de 12,8 bps et est la plus grande expérience de partage quantique de clefs sol-sol sans fibre optique réalisée à ce jour.

Ici la synchronisation des horloges locales des systèmes de datation temporelle est assurée par des oscillateurs ultra-stables asservis par GPS avec une dérive relative inférieure à 10 ps sur 100 s. Cette durée permet de conduire une expérience de mesure d’intrication en polarisation sur plusieurs dizaines de minutes tandis que le régime impulsif de la source permet de limiter le bruit optique dans la fenêtre d’analyse des coïncidences de 1 ns.

Beaucoup plus récemment, soutenues par le programme Européen *EuroQCI*, les expériences de QKD déployées sur plus de 100 km fleurissent dans le paysage européen. Elles offrent cependant une diversité de protocole et de type de transmission plus grande, avec notamment des liens en espace libre, des liens fibrés sous-marins et des protocoles différents comme le twin-field ou le BBM92. Nous présentons dans la suite les réalisations les plus notables.

Le lien de QKD reliant Bratislava en Slovaquie et St. Pölten en Autriche [79] sur 248 km de fibre utilise l’intrication en polarisation (BBM92) comme montré en Figure 1.16. Cette implémentation, réalisée en 2022, constitue le plus long lien de QKD basé sur l’intrication réalisé dans le monde et s’approche de la limite théorique de ce que peut faire ce type de protocole. En effet, le taux de clefs sécurisés asymptotique est en moyenne de 1,4 bps

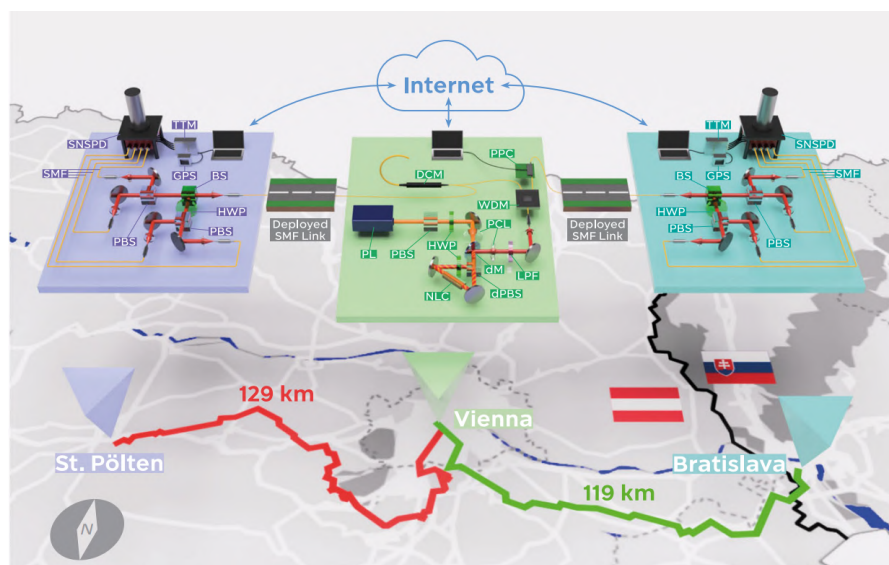


Figure 1.16 – Schéma expérimental des modules (source et analyseurs), ainsi que des fibres déployées formant un lien de QKD basé sur l'intrication exploitant le protocole BBM92, reliant Bratislava et ST. Pölten, pour une distance totale de 248 km de fibre optique, permettant l'extraction d'un taux de clefs asymptotique de 0,66 bps [79].

et chute à 0,66 bps en prenant en compte les effets de clefs finies. Ce taux de clefs très bas est lié à la forte influence des pertes sur les liens de QKD basés sur l'intrication et montre qu'un tel protocole pourra difficilement être intégré sur des distances largement plus grandes de manière efficace.

À l’instar de l’expérience de Tenerife (puisque plusieurs auteurs sont communs aux deux), la synchronisation des horloges locales des systèmes de datation temporelle est assurée par des oscillateurs ultra-stables asservis par GPS avec une dérive relative inférieure à 10 ps sur 100 s à laquelle s’ajoute un suivi actif du pic de coïncidence toutes les 10 s afin de garantir la synchronisation pendant plus de 4 jours.

Un second lien de QKD déployé entre les côtes de Malte et de la Sicile sur 96 km de fibres sous-marines [80, 81] est présenté sur la Figure 1.17. Ce lien a été exploité par deux équipes différentes qui ont mis en avant deux protocoles différents pour des objectifs différents. Chronologiquement, l'équipe de R. Ursin a démontré pour la première fois en 2019 qu'un lien à base d'intrication de près de 100 km était viable avec l'observable polarisation. En pratique, les fibres sous-marines présentent une stabilité remarquable en termes de biréfringence qui permet de réaliser sans correction active de polarisation de la QKD pendant près de 2 h ! Il faut relativiser ces performances moyennes puisqu'en 2019, il s'agissait du plus long lien déployé à base d'intrication. L'équipe de A. Zavatta

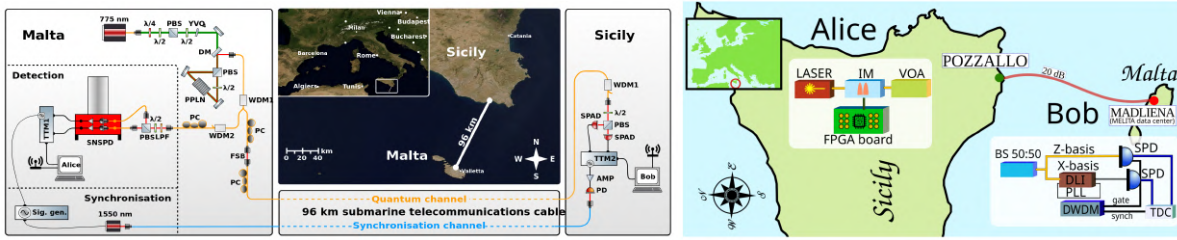


Figure 1.17 – Lien de QKD sous-marin de 100 km. Chronologiquement, l’expérience de gauche [80] est basée sur de l’intrication pour réaliser du BBM92, tandis que l’expérience de droite [81] exploite un laser atténué pour réaliser un protocole de type BB84. Les taux de comptages n’ont pas de sens ici puisque les objectifs se situent respectivement dans la remarquable stabilité en polarisation et l’utilisation de détecteurs InGaAs novateurs.

a quant à elle utilisé le lien pour mettre en avant les performances d’un nouveau type de détecteur de l’institut polytechnique de Milan (à base de semi-conducteur InGaAs) pour faire de la QKD « prepare-and-measure » en amplitude-phase en 2023.

Ici, les deux démonstrations discutées ont exploité une seconde fibre dédiée pour assurer la synchronisation des deux stations.

cour

Pour finir, l’implémentation la plus récente de 2023 qui coche toutes les cases de l’initiative EuroQCI est celle conduite par l’équipe de A. Zavatta [68]. Elle présente un cas d’usage de sécurisation d’un réseau privé (VPN) à l’aide de solutions commerciales (Quantum telecommunication Italy¹²). Le tour de force est ici de relier 3 pays européens, l’Italie, la Slovénie et la Croatie et d’avoir démontré un service de QKD, c’est-à-dire la génération de clefs secrètes utilisables (et utilisées pendant la réunion des ministres du numériques du G20) pendant plusieurs jours. Elle regroupe quatre nœuds sur un lien de ~ 200 km de fibres et permet un partage de clef de l’ordre du kilobit par seconde. Cette valeur de SKR est bien plus faible que ce que peut produire une implémentation comparable de BB84, mais elle est ici liée à l’utilisation de détecteurs plus simples (APD) : moins efficaces, mais aussi moins chers et moins volumineux que ceux habituellement utilisés en laboratoire.

Ici, encore c’est une seconde fibre uniquement dédiée à cette tâche qui assure la synchronisation des quatre stations.

12. QTI : <https://www.qticompany.com>

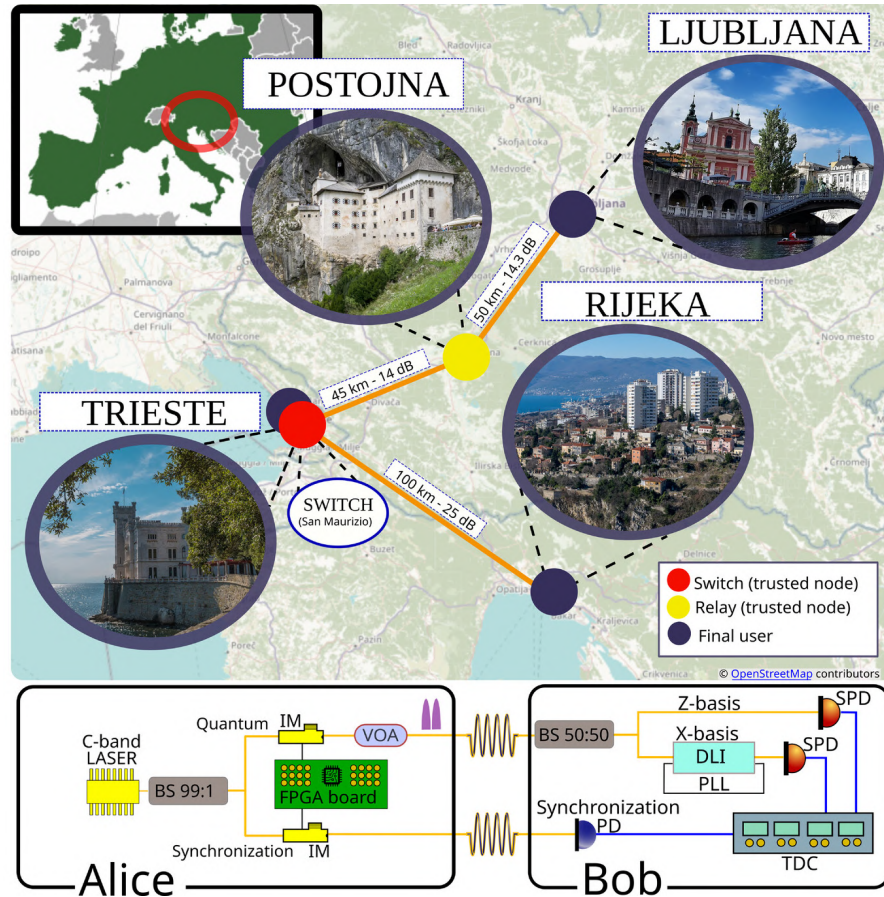


Figure 1.18 – Premier réseau européen de QKD (initiative EuroQCI) qui connecte l'Italie, la Slovénie et la Croatie. Un protocole BB84 a été utilisé pour chacune des liaisons : Trieste–Postojna, Ljubljana–Postojna et Trieste–Rijeka. Les clés quantiques distribuées ont été utilisées pour sécuriser un réseau privé virtuel (VPN) entre les utilisateurs lors du G20 qui s'est tenu à Trieste.

QKD courte distance – les réalisations les plus notables

De nombreux réseaux de QKD à échelle métropolitaine sont déployés à travers le monde. Il n'y a plus de spécificité géographique puisque ces projets sont portés localement par des centres de recherche (université ou laboratoire) dans le but de fournir des bancs d'essai pour des protocoles et dispositifs de QKD. Bien qu'il date de 2019, le rapport technique édité par la commission européenne fait une revue remarquable des différentes implémentations sur chaque continent [82]. Nous ne garderons ici que les réalisations les plus notables qui couvrent l'étendue du spectre de la QKD « courte distance ».

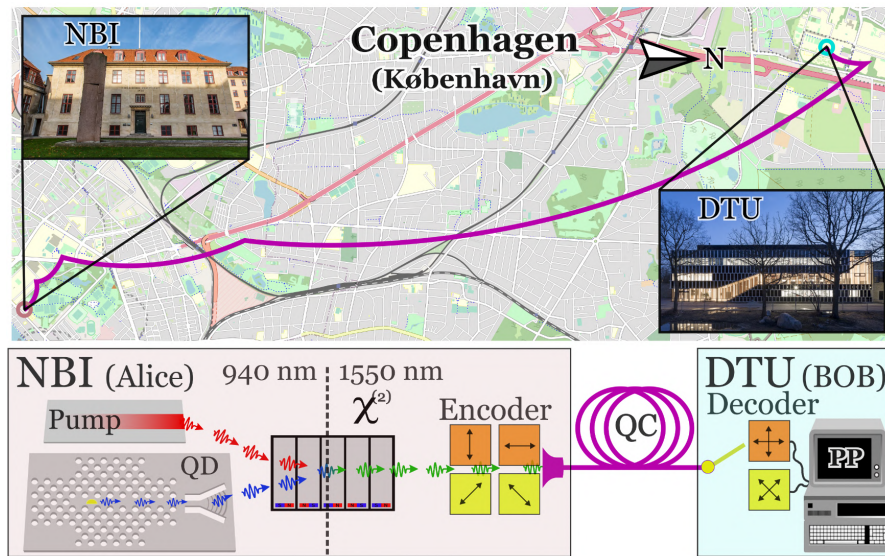


Figure 1.19 – Réseau quantique reliant l'Institut Niels Bohr (NBI) et l'Université technique du Danemark (DTU), d'une longueur de 18 km. Le panneau du bas présente un schéma simpliste de l'expérience, depuis la source de photon unique, l'interface de conversion de fréquence, le système d'encodage jusqu'à l'analyse et le traitement des données. Un taux de clefs secrètes de 3 kbit/s a été atteint en conditions réelles en 2024.

Pour commencer le tour d'horizon des réseaux métropolitains, il faut souligner que la plupart des démonstrations de QKD longue distance sont de type « prepare-and-measure » basées sur des lasers atténués puisque les récents protocoles de type « decoy-state » permettent de garantir la sécurité tout en compensant en partie les pertes par l'augmentation de l'intensité moyenne des impulsions et d'atteindre des taux de communication remarquablement plus élevés que les vraies sources de photons uniques. Pourtant ces dernières offrent des perspectives intéressantes pour le développement de tâches de communication quantique plus avancées impliquant l'intrication et la téléportation et, à terme, un système de QKD totalement indépendant du matériel employé [83]. Par conséquent, une démonstration sur le terrain d'un lien QKD basé sur une source de photons uniques est une étape importante qui a été jusqu'à présent entravée par des faiblesses

récurrentes : un faible taux d'émission des photons, des longueurs d'onde d'émission éloignées des bandes de télécommunication et un fonctionnement à des températures cryogéniques. Les choses sont en train de changer [84] et il est important de citer ici une réalisation remarquable [85] bien que les performances soient encore loin d'atteindre les performances des systèmes à base de laser atténué.

Le tour de force de la réalisation danoise concerne la collection optimisée du photon grâce des structures photoniques (15%) puis la conversion de fréquence efficace (50%) que subit le photon de 942 nm vers 1550 nm permettant de maintenir un taux de photons uniques au-delà du MHz.

Ici encore la synchronisation est réalisée via un canal dédié.

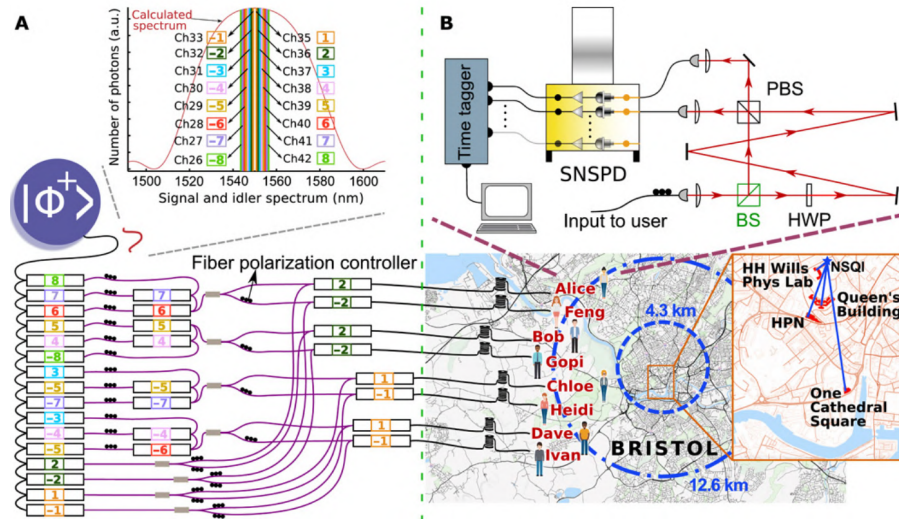


Figure 1.20 – Description du réseau de QKD implémenté à Bristol. Une clique est créée entre huit utilisateurs en distribuant huit paires de canaux de longueur d'onde différents à travers le réseau. Des fibres déployées reliées à des miroirs permettent un semi-déploiement de l'expérience, où les photons traversent des fibres sous Bristol, mais sont émis et analysés sur le même site. Le module d'émission des photons est une source Sagnac en espace libre et les modules d'analyses, eux aussi développés en espace libre, permettent la projection des paires sur deux bases complémentaires.

Il existe une implémentation de réseau de QKD semi-déployé basé sur l'intrication mise en place à Bristol en 2020 qui lie huit utilisateurs dans un réseau complètement connecté, en exploitant le multiplexage en longueur d'onde des paires de photons émises par la source [86].

Comme présenté sur la Figure 1.20, les utilisateurs, ainsi que la source, sont situés dans un même laboratoire, mais les photons sont transmis dans des fibres optiques déployées

sous la ville de Bristol, toutes reliées à des miroirs pour permettre aux signaux de revenir aux analyseurs. Cette configuration permet la réalisation d'une expérience semi-déployée, où les effets des fibres optiques sont pris en compte, sans se confronter pour autant aux problèmes de synchronisation temporelle. Malgré ce caractère semi-déployé et des taux de clés secrètes de l'ordre de 100 bit/s, cette expérience est aujourd'hui le réseau de communication quantique sans trusted nodes reliant le plus d'utilisateurs au monde et prouve la faisabilité de réseaux quantiques, à la fois pour la QKD, mais aussi pour des protocoles plus avancés [87].

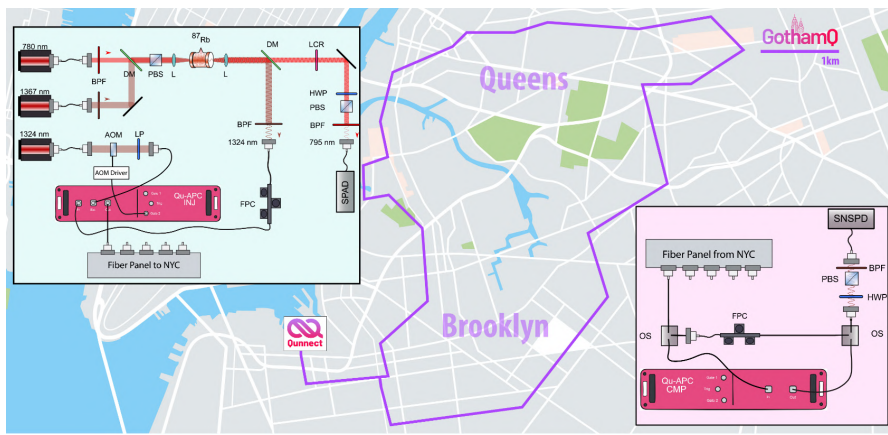


Figure 1.21 – Schéma expérimental des modules (source et analyseurs), ainsi que des fibres déployées formant une boucle dans la ville de New-York. Le protocole est basé sur l'intrication sur une distance totale de 30 km de fibres. Bien que ce ne soit pas à proprement parler de la QKD puisque que seule une mesure de l'intrication a été effectuée, c'est réellement l'étude de l'observable polarisation dans les fibres et la solution commerciale de stabilisation de la polarisation qui rend notable cette démonstration [57].

Le réseau GothamQ, présenté sur la Figure 1.21, forme une boucle de 30 km sous la ville de New-York. À l'instar de la démonstration réalisée à Bristol, les utilisateurs, ainsi que la source, sont situés dans un même laboratoire, mais les photons sont transmis dans des fibres optiques déployées sous la ville. Si ce n'est pas à proprement parler de QKD, la réalisation de la société Qunnect¹³ a le mérite de présenter une solution entièrement automatisée capable de distribuer des photons intriqués en polarisation dans une fibre déployée sur 34 km [57]. Les auteurs ont démontré 15 jours de distribution continue en 2024, avec une fidélité de l'état intriqué supérieure à 94%. Bien que la source d'intrication soit « surprenante¹⁴ » puisqu'il s'agit d'un ensemble atomique de Rubidium

13. <https://www.qunnect.inc/>

14. Pas tant que ça, finalement, pour cette société qui vise le déploiement de véritables réseaux d'information quantique incluant des mémoires quantiques [88]

avec des taux de paires de photons modestes, c'est réellement le système de stabilisation commercial de la polarisation qui est à mon sens important et l'étude approfondie des effets de décohérence sur l'observable polarisation dans des fibres déployées. Avec la démonstration de l'équipe de Bristol, ce sont presque tous les éléments requis pour une véritable démonstration de distribution de clés secrètes en milieu urbain qui sont réunis.

Pour finir, la France est dotée de deux réseaux quantiques déployés. Le premier est situé à Paris tandis que le second se situe à Nice avec des topologies et des objectifs complémentaires.

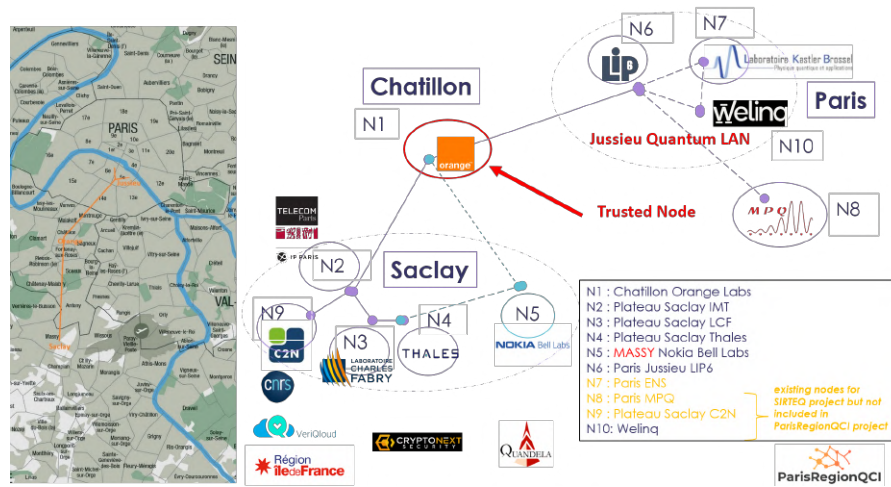


Figure 1.22 – Le réseau « ParisQCI » s'étend sur une centaine de kilomètres et relie les principaux laboratoires de recherche de Paris et sa banlieue. Il regroupe des académiques et des sociétés commerciales avec une topologie riche en termes de nombre de nœuds.

Le réseau ParisQCI, présenté sur la Figure 1.22, opérationnel depuis 2022 a notamment servi à une démonstration de protocoles de QKD à variable continue [89]. Ce qui est remarquable dans la démonstration de l'équipe de E. Diamanti de 2024, ce sont les débits atteints (de l'ordre du MHz), la simplicité de déploiement (pas besoin de détecteurs de photons uniques) et surtout la synchronisation temporelle et la stabilisation relative des oscillateurs locaux de Alice et Bob qui sont entièrement assurés via un traitement numérique du signal quantique [90]. Dans le cadre d'un déploiement intra-urbain, où les distances sont courtes mais les besoins en termes de clés secrètes élevés, l'équipe a démontré un taux de clés secrètes sur 10 km de fibre de l'ordre de 2,5 MBit/s qui montre bien tout l'intérêt et la complémentarité des variables continues pour la QKD.

Le réseau Q@UniCA déployé sur la Côte d'Azur (voir Figure 1.23), est un réseau de



Figure 1.23 – Le réseau Q@UniCA en partenariat avec Orange relie 4 sites académiques avec une ouverture vers les communications spatiales via la station optique sol opérée par le laboratoire GéoAzur. Le réseau est déployé en situation semi-urbaine.

fibres optiques dédié aux expériences de communication quantique. 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. 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. Le site de l'éco-vallée et d'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.

L'atout principal de ce réseau est que nous avons choisi de connecter le centre ville à une station d'observation astronomique en activité et capable de suivre la trajectoire de satellites basse orbite comme en orbite géostationnaire. Le réseau Q@UniCA présente donc la particularité unique en Europe d'offrir d'ores et déjà un banc de test pour les communications quantiques spatiales couplées aux communications quantiques terrestres avec des distances offrant des scénarii d'usage très riches. Les démonstrations faites et à venir seront discutées en détail dans la section 2.3.

Pour conclure ce chapitre et aller plus loin à propos de la synchronisation, je souhaite ajouter un paragraphe sur les techniques qui vont au-delà du simple partage d'une référence optique comme souvent rapporté dans cette section. Une solution élégante basée uniquement sur l'analyse du signal quantique détecté sans nécessiter de matériel

supplémentaire a été discutée et démontrée dans les références [91, 92, 93]. Elle est toutefois limitée à l'identification de l'heure d'arrivée des impulsions d'un laser atténué en supposant que le taux de répétition est connu pour les protocoles QKD de type « prepare and measure ». Par ailleurs, pour les protocoles basés sur l'intrication, il est possible d'utiliser les fortes corrélations temporelles des paires de photons transmises par le réseau pour atteindre un niveau de synchronisation très élevé [64, 94]. Cette méthode exploite certaines informations transportées par le canal quantique sans induire de bruit pour les qbits, évitant ainsi les inconvénients d'autres protocoles de synchronisation temporelle. J'invite le lecteur désireux d'approfondir la partie synchronisation et/ou la coexistence des signaux quantiques avec des signaux classiques à lire les articles suivants [95, 96, 97].

Chapitre 2

Activités de recherche

Les références [i] en caractère gras de cette section se rapportent à la notice bibliographique de la section 5. Les étudiants que j'ai encadrés apparaissent soulignés dans la liste des auteurs.

Mon travail de recherche s'inscrit dans le contexte de la photonique quantique, c'est-à-dire l'exploitation des observables physiques portées par les photons pour réaliser des opérations destinées aux communications quantiques. En pratique, les observables exploitées sont la polarisation, le temps d'émission ou le mode spatial, et c'est réellement leur complémentarité et leur ingénierie qui servent les expériences de communications quantiques réalisées aujourd'hui. Par ailleurs, ces travaux partagent tous un aspect important : l'exploitation de l'optique guidée comme une « technologie habilitante ». Mes activités ont commencé en 2001 au laboratoire de Physique de la Matière Condensée, puis ont continué lors de mon séjour post-doctoral à l'université de Bristol de 2004 à 2006. Enfin depuis 2006, je conduis mes activités de recherche dans l'équipe *photonique et information quantique* de l'Institut de Physique de Nice.

Mon travail de recherche couvre une vingtaine d'années de recherche, nous noterons donc une progression chronologique de la complexité, en termes de techniques expérimentales, des travaux qui vont être présentés puisque mes activités ont commencé par la réalisation de « simples » sources de photons uniques annoncés [40,39,37,36], en passant par la réalisation de sources de paires de photons intriqués [34,31,30, 28,21,18] puis l'exploitation d'interférences à deux photons [33,29,27,20], pour ensuite proposer l'intégration de tous ces précédents concepts sur des puces photoniques [23,19,14,6,4]. Il faut comprendre que toutes ces expériences forment un socle de connaissances et de techniques qui me permettent aujourd'hui de me positionner favorablement dans la « seconde révolution quantique » qui enjoint les chercheurs à sortir du laboratoire et proposer des expériences très appliquées de communications quantiques en champ réel [5,2]. Mes activités actuelles s'attachent à réaliser des expériences en champ réel et adresser les besoins nouveaux liés à ce déploiement tels que la synchronisation, la stabilisation d'interféromètres distants et la cohabitation des signaux classiques et quantiques sur un même support.

L'éventail des articles est large et pour la présentation de mes activités de recherche,

je n'ai retenu qu'une sélection d'articles significatifs sur lesquels s'appuient mes travaux actuels et futurs. C'est en premier lieu mon travail sur l'exploitation de l'optique guidée/intégrée pour obtenir des sources plus compactes, plus robustes et plus efficaces qui ont permis de nous positionner favorablement lorsqu'il a fallu réaliser de expériences hors laboratoire. C'est également un second volet de mes activités qui concerne la manipulation des états quantiques, c'est-à-dire leur transposition en fréquence ou leur téléportation. Ces expériences seront le support des prochaines générations de protocoles à sortir du laboratoire que ce soit sur le réseau de fibre Q@UniCA et vers l'espace.

La structure de ce chapitre est la suivante :

- Les expériences mettant en jeu des techniques expérimentales issues de l'optique guidée pour réaliser des dispositifs plus compacts, plus robustes et efficaces.
- Les expériences permettant de manipuler les états quantiques, c'est-à-dire faire interférer des photons indépendants ou assurer leur conversion de fréquence.
- Les expériences de communication quantique sur réseau déployé.

2.1 Sources de paires de photons

Un grande partie de mon travail depuis ma thèse jusqu'à aujourd'hui s'est consacrée à concevoir des dispositifs d'émission de lumière quantique. J'entends par là des sources capables d'émettre des photons uniques ou des paires de photons intriqués. Le dénominateur commun à toutes ces sources est l'optique non-linéaire dans des guides d'onde qui permettent d'obtenir une efficacité de génération de paires de photons la plus élevée qui soit. À titre d'exemple, il faut comprendre que l'on gagne plus de 3 ordres de grandeurs sur la brillance d'une source, c'est-à-dire sur le taux de paires émises par seconde, par fenêtre spectrale et par mW de pompe. Cela ouvre des perspectives non seulement en termes de performances pures [39,37,35,34,31,30,28,21,17] mais également en termes de montages plus ambitieux en manipulation des observables [18,9,6]. Au-delà de ces avantages directs, l'optique intégrée offre également un contrôle des interactions non-linéaires plus riche en jouant avec les formes et les constantes de propagation des modes. C'est essentiellement cet aspect que j'ai exploité pour proposer des sources novatrices en termes de performances [32,27,12,10]. Il faut noter que l'ensemble des travaux de cette partie ont été ponctués par trois articles de revue [25,15,1] en 2012, 2016 et 2024 sur le rôle de l'optique intégrée dans le développement des technologies quantiques.

Il est toutefois important de clarifier une notion importante à propos de la brillance des sources. Cette course à l'efficacité ne doit pas être interprétée comme une possibilité de produire toujours plus de paires de photons par seconde. En effet, le taux maximal de paires requis pour une expérience de communication quantique est généralement défini par la capacité à détecter et analyser les corrélations par fenêtre temporelle et spectrale. Livrons-nous à un petit calcul : la brillance par bande spectrale de 100 GHz (un standard des télécommunications) et par milliwatt de pompe s'établit entre $\sim 10^1$ et $\sim 10^8$ pour les meilleures sources. La durée typique des intervalles d'analyse sur les systèmes de

datation temporelle est quant à elle aux alentours de 1 ns et il s'agit d'éviter les régimes dans lesquels plus d'une paire de photons est créée dans une fenêtre d'analyse. Cela nous conduit donc à estimer que nous avons besoin au maximum de $\sim 10^8$ paires.s⁻¹ et que les puissances requises pour alimenter ces dispositifs de génération de paires de photons s'établissent entre 1 W et 100 μ W. Aucune de ces puissances n'est inaccessible aujourd'hui dans les longueurs d'onde usuelles du visible et de l'infrarouge, mais une meilleure efficacité de génération permet d'atteindre ce régime de fonctionnement avec des lasers, moins puissants, moins bruyés, plus compacts, qui dégagent moins de chaleur, donc qui présentent intrinsèquement une plus grande stabilité (en longueur d'onde et en puissance) et qui sont dotés d'une meilleure cohérence temporelle. Cette brillance doit donc être interprétée comme un facilitateur en terme de mise en place d'une expérience et un gage de performances en termes de qualité d'état quantique généré.

Il est intéressant de remarquer que les travaux s'étalent sur une période de 2004 à 2024 et qu'il est possible d'observer un accroissement des fonctionnalités en termes de débit, d'observables utilisées ou de versatilité. Chaque papier correspond à une source basée sur l'optique guidée que nous avons développée pour répondre à un besoin spécifique préalablement identifié. Nous verrons que les matériaux utilisés varient du niobate de lithium au silicium, en passant par le verre et que pour certaines réalisations, j'ai fait le choix d'en combiner plusieurs pour atteindre des objectifs précis. C'est justement ces composants intégrés, stables et robustes qui ont rendu possible certaines réalisations « hors laboratoire » de la section 2.3.2.

2.1.1 Niobate de lithium : LiNbO₃

[39,37,35,34,32,31,30,28,27,21,18,17,12,10,9,6]

[39] **High performance guided-wave asynchronous heralded single photon source**, O. Alibart, S. Tanzilli, D.B. Ostrowsky and P. Baldi, Optics letters **30**, 12 (2005)

Chronologiquement, mes travaux de thèse s'attachaient à démontrer la faisabilité d'une source de photons uniques annoncés à partir de guides d'onde sur niobate de lithium. Les enjeux technologiques étaient d'ajuster les conditions d'accord de phase afin d'obtenir des paires de photons non dégénérées aux longueurs d'onde des télécommunications de 1550 nm et 1310 nm respectivement tandis que les objectifs étaient de réaliser un dispositif qui exploiterait un maximum de composants issus des télécoms comme présenté sur la Figure 2.1. Pour la toute première fois, la fibre de récolte était directement « collée¹ » à un guide d'onde fabriqué par échange protonique doux sur niobate de lithium [39] pour lequel le mode optique avait été mis en forme pour offrir un recouvrement maximal avec le mode d'une fibre monomode standard. Nous avons obtenu un couplage des

1. Techniquement, elle était simplement maintenue appuyée contre le guide grâce à un banc de nano-positionnement XYZ.

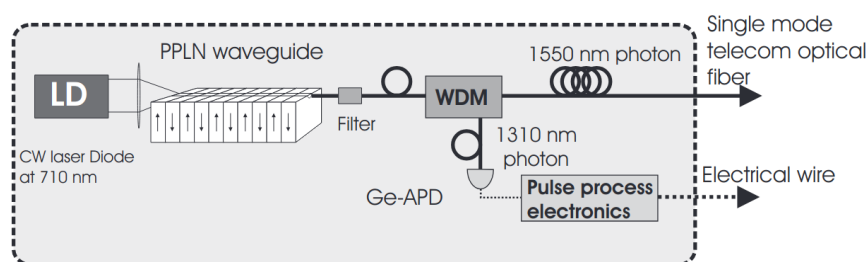


Figure 2.1 – Source de photons uniques annoncés 100% fibré développée durant ma thèse. C’est un accord de phase dans le niobate de lithium ajusté pour $710\text{ nm} \rightarrow 1550\text{ nm} + 1310\text{ nm}$ qui permet d’utiliser des composants hautes performances issus des technologies des télécommunications.

photons dans la fibre optique de 58% qui est principalement limité par le recouvrement imparfait des modes du guide (qui a forme hémicirculaire) et de la fibre. Il faut souligner qu’en 2004, il s’agissait de la toute première source de paires de photons au monde à être 100% fibrée et qui exploitait des composants issus des télécommunications optiques. Le montage de type photons uniques annoncés a permis de mettre en valeur les performances des composants standards et de montrer que la technologie de l’optique guidée était réellement une technologie habilitante de la photonique quantique. Les excellentes performances démontrées (en termes de couplage et de brillance²) ont ouvert la voie aux différentes solutions qui suivront dans la suite du manuscrit et qui ont jalonné le domaine de la photonique quantique intégrée.

La référence [98] de S. Tanzilli *et al.* avait montré l’excellente qualité de l’intrication produite par ce type de structure ne nécessitant que quelques microwatts de puissance optique pour fonctionner. Mon travail avait mis en avant l’intérêt d’exploiter plus encore les composants issus de l’optique guidée pour réaliser des fonctionnalités nouvelles : c’est le début d’une intense activité portée par S. Tanzilli et moi-même à démontrer le potentiel de l’optique intégrée et de l’optique guidée pour des tâches dédiées aux communications quantiques aux longueurs d’onde des télécommunications.

[30] Generation of polarization-entangled photons using type-II doubly periodically poled lithium niobate waveguides, K. Thyagarajan, J. Lugani, S. Ghosh, K. Sinha, A. Martin, D. B. Ostrowsky, **O. Alibart** and S. Tanzilli, *Physical Review A* **80**, 052321 (2009)

2. À comparer par exemple avec la référence [40] réalisée simultanément à Genève pour laquelle les performances en termes de couplage n’est que marginalement supérieure (60%) tandis que la brillance est très significativement moins bonne (3 ordres de grandeurs).

[32] Increased pump acceptance bandwidth in spontaneous parametric down conversion process using Bragg reflection waveguides, K. Thyagarajan, R. Das, O. Alibart, M. de Micheli, D.B. Ostrowsky and S. Tanzilli, Optics Express **16**, 3577-3582 (2008)

Je souligne dans cet axe direct, les travaux théoriques et numériques conduits en collaboration avec K. Thyagarajan de l'Indian Institute of Technology Delhi dont l'objectif était de mettre en avant les possibilités d'ingénierie des propriétés spectrales et quantiques des paires de photons en jouant avec les paramètres opto-géométriques des guides d'ondes comme présenté sur la Figure 2.2.

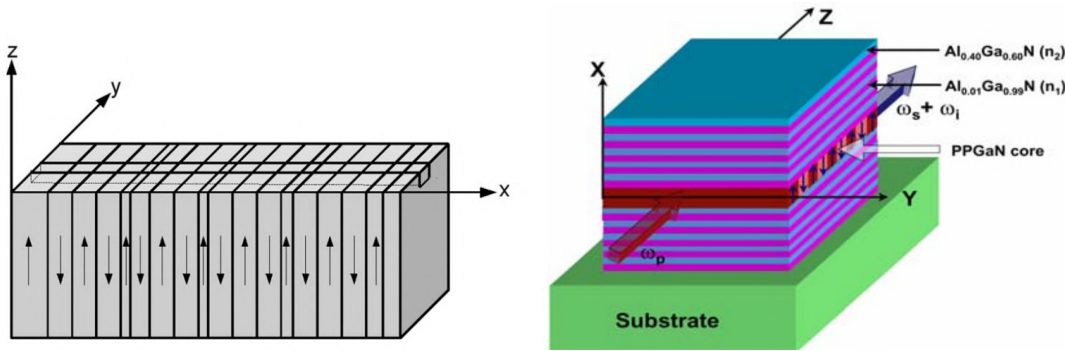


Figure 2.2 – Gauche : Mise en forme des propriétés quantiques en termes d'intrication en polarisation en jouant sur la périodicité de l'inversion du signe de la polarisation non-linéaire du LiNbO₃ [30]. **Droite :** Mise en forme spectrale des paires de photons en jouant sur les constantes de propagation des trois ondes en interaction dans le GaN [32].

La référence [32] visait à produire des paires de photons dont le photon « signal » présente une largeur spectrale aussi étroite que celle du photon de pompe³ en rendant égales les vitesses de groupe de propagation de l'onde signal et pompe par ingénierie des constantes de propagation du guide d'onde. Dans la même veine, la référence [30] propose une ingénierie du quasi accord de phase afin de produire des paires de photons intriqués en polarisation pour des longueurs d'onde non dégénérées qu'il faut mettre en regard des travaux qui vont suivre. En effet, les contraintes imposées par la dispersion chromatique dans les matériaux et l'accord de phase dans le mélange à trois ondes imposent une dégénérescence spectrale stricte pour observer de l'intrication en polarisation pour les sources de type II, c'est-à-dire produisant naturellement un état $\frac{1}{\sqrt{2}}(|HV\rangle + |VH\rangle)$ à la sortie du guide d'onde.

3. L'idée est de produire des sources de photons « purs » au sens de la décomposition de Schmidt temporelle [99], autrement dit en limite de transformée de Fourier pour des expériences d'interférence à deux photons avec des sources indépendantes (voir section 2.2.1).

- [28] Polarization entangled photon-pair source based on a type-II PPLN waveguide emitting at a telecom wavelength, A. Martin, A. Issautier, H. Herrmann, W. Sohler, D. B. Ostrowsky, **O. Alibart** and S. Tanzilli, New Journal of Physics **12**, 103005 (2010)
- [31] Integrated optical source of polarization entangled photons at 1310 nm, A. Martin, V. Cristofori, P. Aboussouan, H. Herrmann, W. Sohler, D. B. Ostrowsky, **O. Alibart** and S. Tanzilli, Optics Express **17**, 1033-1041 (2009)

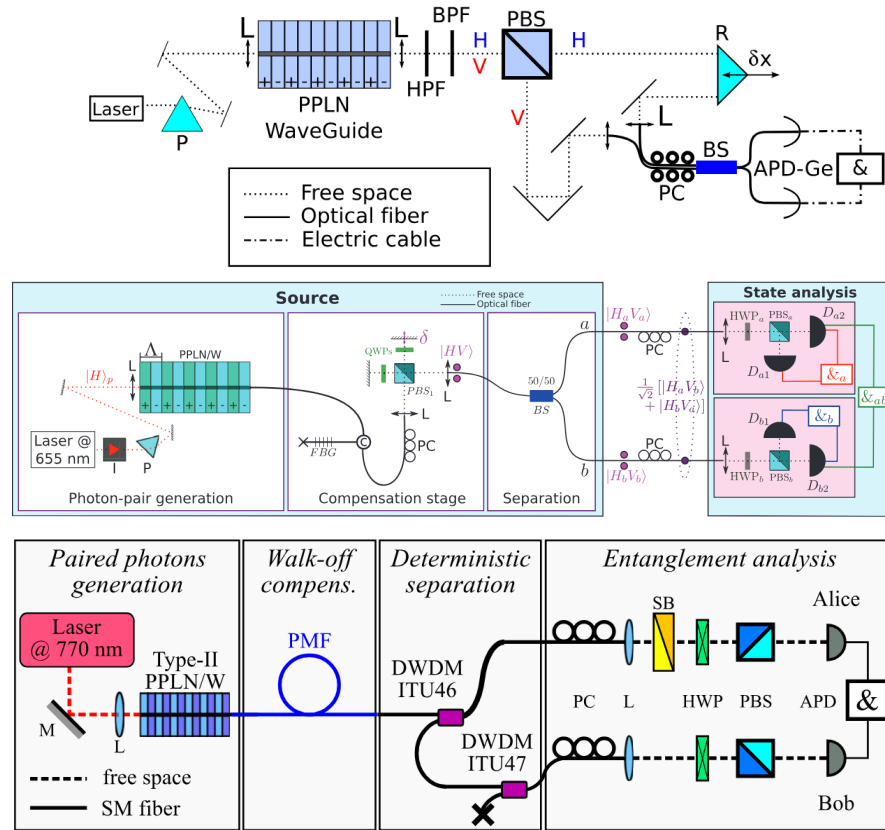


Figure 2.3 – Développement et évolution d’une source de paires de photons intriqués en polarisation sur la base d’un cristal non linéaire de type-II. L’équipe de Paderborn était l’une des rares au monde à produire des guides d’ondes par diffusion titane capables de guider les deux polarisations H et V du champ électromagnétique. Notre travail a été d’exploiter cette source pour tirer le meilleur de sa configuration guidée et des longueurs d’onde à 1310 nm ([31,28] et [100])

Une série de travaux en collaboration avec le groupe de W. Sohler à Paderborn a consisté à produire la toute première source de paires de photons intriqués en polarisation à base d’optique intégrée. Il faut situer le contexte puisqu’en 2009, la référence

mondiale en termes de source de paires de photons intriqués en polarisation était la source en optique massive développée par P. Kwiat [101, 102] qui émet des photons dans le visible. L’objectif ici était de fournir un dispositif équivalent mais adapté aux longueurs d’onde des télécommunications et tirant parti de l’optique guidée. Cette source repose sur l’interaction paramétrique de type-II qui génère naturellement des paires de photons dégénérés intriqués en polarisation. Notre travail a été d’exploiter ce cristal pour tirer le meilleur de sa configuration guidée et des longueurs d’onde à 1310 nm. Il s’agissait en particulier ici de produire l’état

$$|\psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|HV\rangle + |VH\rangle)$$

La partie remarquable du travail effectué consiste à compenser la différence de vitesse de propagation des photons polarisés horizontalement et verticalement due à la biréfringence du PPLN qui nuit à la qualité de l’intrication. Il est possible de voir sur la Figure 2.3 l’évolution chronologique de la source qui devient de plus compacte, plus stable et qui offre des pertes de collection améliorées sur la base du même cristal⁴. Il est intéressant d’observer ici l’évolution du degré d’intégration tout au long des 3 publications [31,28] et [100].

C’est réellement grâce à l’optique intégrée sur LiNbO₃, que la brillance de ces sources a atteint $\sim 10^6$ paires.s⁻¹.mW⁻¹ par canal ITU, c’est-à-dire qu’environ un milliwatt est requis pour faire fonctionner cette source dans un régime optimal. Par ailleurs, la qualité des composants télécom a permis de démontrer ~ 5 dB de pertes entre le guide d’onde et la sortie du dispositif, ce qui nous a permis de travailler avec peu de bruit et de montrer des qualités d’intrication à hauteur de 99,5%. Ces performances mises bout à bout mettent en évidence le potentiel élevé de l’optique intégrée non linéaire pour réaliser des dispositifs pour les communications quantiques. Notamment dans le dernier cas [100], la configuration était exempte de tout type de fluctuation (phase, intensité) pendant la durée de la mesure. Cela prouve également le très haut niveau de contrôle que nous avons atteint sur tous les paramètres expérimentaux dès 2012.

Les quatre travaux qui suivent me paraissent importants et complémentaires à plusieurs égards. Ils sont à l’origine des réalisations de sources de paires de photons intriqués en cours au sein de l’équipe PIQ. Individuellement, ils répondent à des besoins qui relevaient de défis fondamentaux mais, combinés ensemble, ils constituent les innovations requises pour répondre aux besoins des démonstrations de communications quantiques en champ réel : une finesse spectrale ajustable à volonté, des paires de photons intriqués sur plusieurs observables, des montages interférométriques ultra-stables sur la base de boucles de Sagnac non-linéaires et enfin des dispositifs 100% télécom.

4. En reprenant le couplage d’une fibre directement « collée » au guide d’onde

- [18] **Polarization entangled photon-pair source based on quantum nonlinear photonics and interferometry**, F. Kaiser, L. Arif Ngah, A. Issautier, T. Delord, D. Aktas, V. D'Auria, M.P. De Micheli, A. Kastberg, L. Labonté, O. Alibart, A. Martin and S. Tanzilli, *Optics Communication* **327**, 7–16 (2014)
- [21] **A versatile source of polarisation entangled photons for quantum network applications**, F. Kaiser, A. Issautier, L. Arif Ngah, O. Alibart, A. Martin and S. Tanzilli, *Laser Physics Letters* **10**, 045202 (2013)

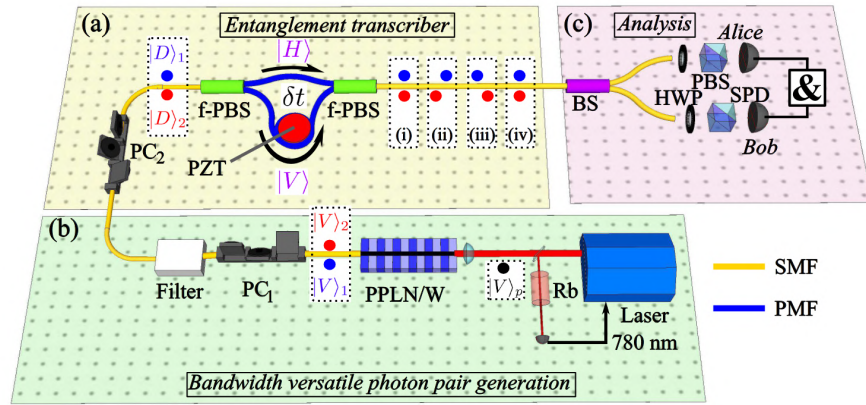


Figure 2.4 – Une conception robuste de source de paires de photons intriqués en polarisation à base de guide d’onde LiNbO₃. L’aspect notable de la source est d’offrir un choix de la finesse spectrale qui s’adapte de 25 MHz jusqu’à 100 GHz. L’astuce se situe dans l’exploitation de l’intrication en énergie temps et de sa transposition en polarisation (« entanglement transcriber ») tout en montrant des visibilités de 99% [21].

Les références [18,21], regroupées sur le montage de la Figure 2.4, répondent au besoin de réaliser une source d’intrication en polarisation dont les propriétés spectrales sont compatibles avec les caractéristiques des mémoires quantiques. La longueur d’onde n’est évidemment pas adaptée aux transitions atomiques dans les alcalins mais elle le sera via des interfaces de conversion de fréquence des références [11,38] de la section 2.2.3. Il s’agissait ici d’adapter la largeur spectrale des photons jusqu’à quelques dizaines de MHz. Il faut comprendre qu’il y a 6 ordres de grandeurs entre la largeur spectrale naturelle des paires de photons issues de SPDC et celle des transitions atomiques. L’approche conventionnelle qui consiste à placer le cristal non-linéaire au sein d’une cavité Fabry-Pérot apporte son lot d’instabilités interférométriques rédhibitoires en utilisation hors laboratoire [103, 104, 105, 106]. L’approche retenue découple la source de paires de photons de l’étape de filtrage en exploitant la brillance record des guides PPLN couplée à la qualité et la stabilité des composants interférométriques à base d’optique guidée.

La technologie des miroirs de Bragg inscrits dans les fibres optiques permet de concevoir des filtres dont la bande passante peut être choisie à volonté entre 100 GHz et

25 MHz. Nous avons donc, sur la Figure 2.4, filtré en tout premier les paires de photons à la largeur spectrale désirée au prix d'une réduction de brillance de $\sim 10^6$ paires.s⁻¹.mW⁻¹ à $\sim 10^3$ paires.s⁻¹.mW⁻¹ qui reste supérieure à n'importe quelle approche à base d'optique massive.

L'ingénierie de l'intrication est ensuite assurée via un dispositif de transposition d'intrication énergie-temps en intrication en polarisation à l'aide d'un interféromètre très fortement déséquilibré (~ 18 m de fibre) dont la stabilisation active a été nécessaire grâce à un laser de référence. Cette approche originale a permis de démontrer de l'intrication en polarisation et en énergie-temps avec des visibilités supérieures à 99%.

Aujourd'hui les références [18,21] constituent encore un design récurrent pour réaliser une source d'intrication photonique dont la largeur spectrale serait adaptable entre 100 GHz et 25 MHz via un simple filtre qui vient « tailler » dans le spectre naturellement large de la génération paramétrique spontanée.

[9] **Fibre based hyperentanglement generation for dense wavelength division multiplexing**, P. Vergyris, F. Mazeas, E. Gouzien, L. Labonté, O. Alibart, S. Tanzilli, and F. Kaiser, *Quantum Science and Technology* **4**, 045007

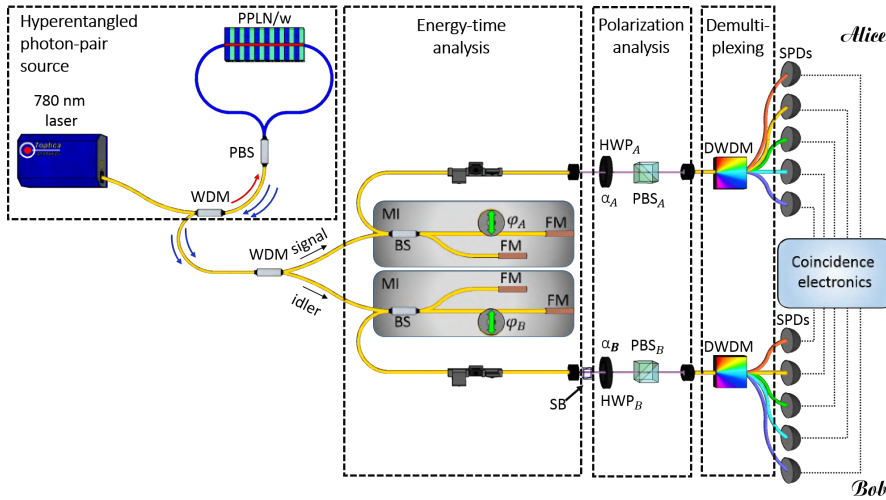


Figure 2.5 – Première apparition d'une boucle de Sagnac non-linéaire pour générer des paires de photons intriqués en polarisation. Inspiré de mes travaux de post-doctorat (voir Figure 2.7), cela a permis de réaliser la première source d'hyper-intrication télécom dont la brillance était de tout premier ordre [9]. Nous avons également montré pour la première fois une violation simultanée des inégalités de Bell en polarisation et en énergie-temps.

Pour pouvoir atteindre des largeurs spectrales extrêmement fines, le travail précédent avait dû faire des compromis techniques afin d'offrir de l'intrication en polarisation. Pour

combattre la biréfringence résiduelle des filtres, nous nous sommes appuyés sur un étage de conversion (post-filtrage) de l'intrication énergie-temps (« entanglement transcriber » sur la Figure 2.4) en intrication en polarisation au prix d'une post-sélection sur les coïncidences mesurées induisant 3dB de pertes supplémentaires. Le travail rapporté dans la référence [9] s'attache, quant à lui, à offrir de l'intrication en polarisation sans post sélection. Pour cela, nous exploitons une configuration interférométrique dont la stabilité passive est reconnue : un interféromètre en configuration Sagnac. En réalité, il s'agit d'un interféromètre non-linéaire puisqu'en son cœur on retrouve un cristal non-linéaire de LiNbO_3 de type-0. C'est véritablement un état à paire de photons qui interfère dans le sens horaire et anti-horaire pour former un état quantique du type :

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|HH\rangle + |VV\rangle)$$

Nous retrouvons évidemment des performances de premier ordre en termes de brillance tandis que la visibilité des interférences en énergie-temps et en polarisation était limitée à 90% au maximum. Cette réduction de qualité d'intrication est principalement due à la boucle Sagnac fibrée qui doit composer avec deux longueurs d'onde très dissemblables 780 nm et 1560 nm. Nous avons montré que la dispersion chromatique dans la silice rend les deux chemins (horaire et anti-horaire) pas tout à fait indiscernables et contribue à des fluctuations de la phase relative au sein de l'état intriqué $\frac{1}{\sqrt{2}} (|HH\rangle + e^{i\varphi}|VV\rangle)$ qui tendent à diminuer la qualité de l'intrication. Par ailleurs, un défaut de cette source est le PBS optimisé pour la longueur d'onde des télécommunications et dont les performances à 780 nm étaient plus que moyennes, c'est-à-dire que la transmission globale du faisceau de pompe était de 50% et que le rapport d'extinction des polarisations est de 30 :1. C'est cet aspect que nous avons amélioré au cours du travail qui suit.

Combiné au travail suivant, ce concept définit toutefois un design robuste qui constitue aujourd'hui une référence en termes de sources actuellement développées au laboratoire pour nos expériences déployées en champ réel de la section 2.3.2.

[17] Ultra-fast heralded single photon source based on telecom technology, L.Arif Ngah, **O. Alibart**, L. Labonté, V. D'Auria and S. Tanzilli, *Laser & Photonics Reviews* **9**, L1–L5 (2015)

Le principal atout du mélange à trois ondes est également sa plus grande faiblesse. La génération paramétrique descendante (SPDC en anglais) implique trois champs optiques pour lesquels la conservation de l'énergie impose que le champ de pompe ait une fréquence deux fois supérieure à celle des champs signal et idler. Cela permet une génération de paires de photons exempte de bruit optique grâce à une élimination facile des photons de pompe qui n'ont pas été convertis en paires de photons (c'est-à-dire 99,9999999%). En contrepartie, cela rend difficile comme nous l'avons vu lors du travail précédent, la gestion des différentes longueurs d'onde lorsqu'il s'agit de réaliser des montages inter-

férométriques avancés. Cela implique aussi une contrainte forte sur le choix des lasers pour « alimenter » les cristaux non-linéaires surtout quand on mesure l'essor des sources cohérentes pour les télécommunications optiques haut-débit.

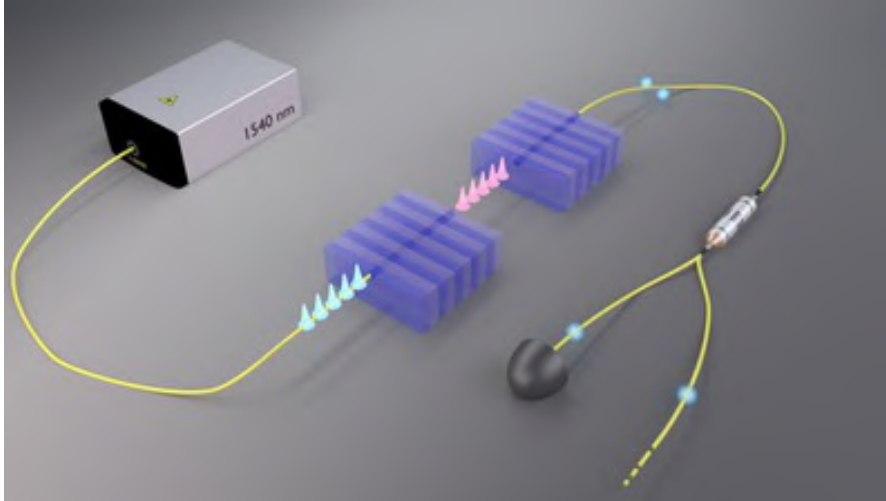


Figure 2.6 – Première réalisation d’une source de paires de photons à très haute cadence. Le laser de pompe, une horloge optique fonctionnant aux longueurs d’onde télécom (impulsions bleues), est en premier lieu doublé en fréquence (impulsions rouges) dans un guide PPLN puis utilisé dans un second guide PPLN pour produire des paires de photons (sphères bleues) à la cadence de 2,5 GHz. Entre les deux cristaux non-linéaires, une réjection du résidu de pompe à 1550 nm de minimum 120 dB est nécessaire [17].

Un des objectifs du travail [17], car nous en reparlerons à la section 2.2.1, était d’étendre l’exploitation à 100% de composants télécom en incluant le laser de pompe. L’idée générale est de tirer parti des lasers cohérents haute cadence disponibles pour les communications optiques haut-débit et également de faciliter l’intégration et la gestion des longueurs d’onde dans les montages interférométriques. Comme présenté sur la Figure 2.6, pour assurer la bonne longueur d’onde des photons de pompe, il faut effectuer au préalable une opération de doublage de fréquence des photons issus du laser télécom. Le processus de génération de seconde harmonique est un processus dont l’efficacité peut atteindre des valeurs élevées pour peu qu’on injecte de la puissance ou qu’on utilise des guides d’onde non-linéaires. Les principaux défis sont de disposer de deux cristaux non-linéaires identiques et surtout d’assurer le filtrage des résidus de pompe entre les étages de doublage de fréquence et de génération de paires de photons. Dans ce travail de 2015, il s’agissait de filtres passe-haut en optique massive qui se transformeront dès 2019 en des composants fibrés. Nous avons montré le potentiel de cette approche à l’aide d’un laser télécom cadencé à 2,5 GHz et avons mesuré des photons uniques annoncés de très haute pureté $g^{(2)}(0) \leq 10^{-3}$ associés à des taux de comptage qui définissaient l’état de l’art à l’époque.

Comparées aux performances habituelles observées en 2025, les faibles efficacités des détecteurs utilisés rendent l'annonce des taux de comptage peu flatteurs (quelques MHz) mais il faut ici mettre en avant que le mode de fonctionnement impulsif picoseconde est indispensable pour l'évolution des communications quantiques 2.0 pour lesquels des interférences entre sources indépendantes sont requises. Dans ce contexte, cette source constitue un design éprouvé qui a montré des performances au-delà de l'état de l'art en 2015.

2.1.2 Silice : SiO₂

De nombreuses idées, telles que le pompage picoseconde ou la configuration Sagnac, proviennent également de mon postdoctorat effectué à l'université de Bristol où j'ai étudié les fibres micro-structurées pour les applications quantiques.

[37] High brightness single mode source of correlated photon pairs using a photonic crystal fiber, J. Fulconis, O. Alibart, W. J. Wadsworth, P. St.J. Russell and J. G. Rarity, Optics Express **13**, 7572-7582 (2005)

[35] Photon pair generation using four-wave mixing in a microstructured fibre : theory versus experiment, O. Alibart, J. Fulconis, G. K. L. Wong, S. G. Murdoch, W. J. Wadsworth and J. G. Rarity, New Journal of Physics **8**, 67 (2006)

[34] Nonclassical Interference and Entanglement Generation Using a Photonic Crystal Fiber Pair Photon Source, J. Fulconis, O. Alibart, J.L. O'Brien, W. J. Wadsworth and J. G. Rarity, Physical Review Letters **99**, 120501 (2007)

[27] Intrinsically narrowband pair photon generation in microstructured fibres, A. Clark, B. Bell, J. Fulconis, M. M. Halder, B. Cerny, O. Alibart, C. Xiong, W. J. Wadsworth and J. G. Rarity, New Journal of Physics **13**, 065009 (2011)

Pourquoi générer des paires de photons dans des guides d'ondes pour ensuite les injecter dans une fibre optique, alors que tout pourrait se faire dans des fibres ? C'est la question que s'est posée l'équipe du Pr. Rarity de l'Université de Bristol. En collaboration avec l'université de Bath, nous avons exploré les possibilités d'ingénierie du mélange à quatre ondes afin d'obtenir des paires de photons directement dans une fibre optique avec des propriétés quantiques de premier ordre. L'intérêt premier est évidemment de tirer parti de la maturité technologique de fabrication des fibres optiques et en particulier des fibres micro-structurées (voir Figure 2.7) afin de coupler haute brillance et haute efficacité de collection dans une fibre optique standard. Alors certes, les longueurs d'onde ne sont pas compatibles télécom, mais il faut se rappeler qu'en 2004 la diffusion des détecteurs de photons infrarouges reste confidentielle et que leur efficacité ne dépasse guère 10%. Pour réaliser une preuve de principe, nous avons fait le choix de travailler avec des photons dont la longueur d'onde est située dans le visible où les détecteurs silicium font des miracles.

Les travaux présentés sur la Figure 2.7 couvrent l'évolution depuis la simple source de paires de photons jusqu'à la mise en place d'un montage interférométrique de type Sagnac afin d'obtenir des paires de photons intriqués en polarisation de la forme

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|HH\rangle + |VV\rangle)$$

Dans le cas de la silice, il n'y a pas de non-linéarité d'ordre 2, il faut donc s'appuyer sur du mélange à 4 ondes $\chi^{(3)}$ pour lequel les longueurs d'onde des 4 photons impliqués sont extrêmement proches. Cela pose des contraintes que l'on retrouve dans le pompage en cascade de type SHG+SPDC dans le LiNbO₃ du paragraphe précédent. Le confinement extrême de la lumière a permis d'obtenir des brillances élevées qu'il n'est pas aisé de comparer mathématiquement avec celles obtenues dans le niobate de lithium puisque la dépendance est ici quadratique en fonction de la puissance de pompe. Toujours est-il que d'un point de vue pratique, en injectant quelques mW de pompe dans 20 cm de fibre, nous obtenions presque un MHz de coïncidences avec un rapport signal à bruit supérieur à 10.

Un aspect important du travail a également visé les interférences entre sources indépendantes que nous retrouverons dans la section 2.2.1 et un axe de recherche que j'ai mené à Bristol visait à produire des photons dans des états purs, c'est-à-dire naturellement en limite de transformée de Fourier [27] afin d'assurer leur indiscernabilité lors des expériences d'interférence à deux photons.

Cette activité dans les fibres sera poursuivie dans la section 2.2.1 mais est également le précurseur des activités dans les circuits silicium (à Nice et à Bristol) qui offrent une qualité de fabrication hors normes de circuits extrêmement compacts et dotés de fonctions avancées pour la manipulation d'états quantiques [6,10] et [107, 108, 109].

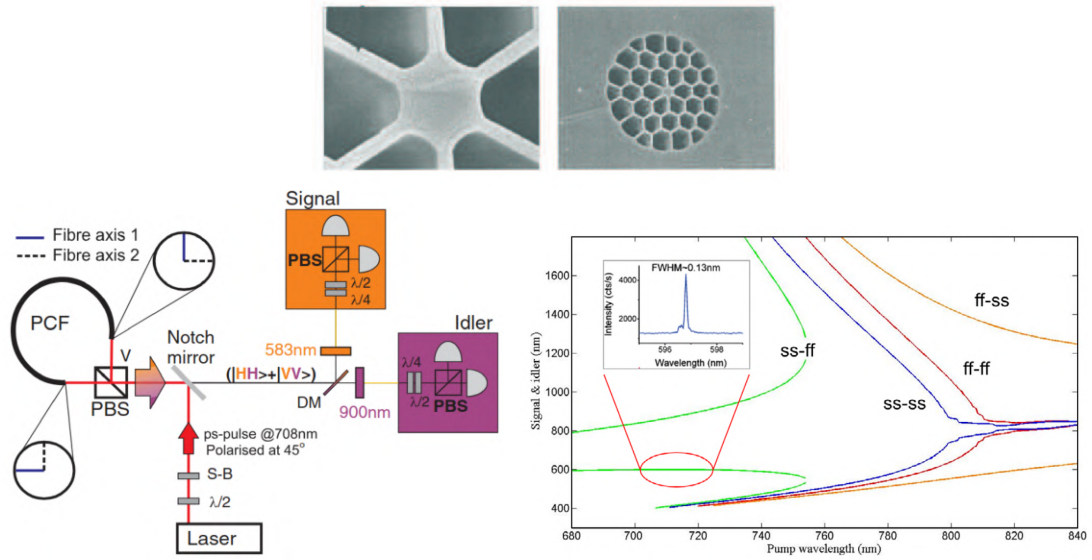


Figure 2.7 – En haut : Profil au microscope d’une fibre micro-structurée. La lumière est guidée dans le cœur central de $2\mu\text{m}$ qui est « suspendu » dans l’air grâce à un réseau de bras qui donnent l’apparence d’une fibre à gaine creuse. Ce confinement extrême amplifie les effets non-linéaires tandis que la fibre garde ses propriétés mécaniques permettant de réaliser des montages interférométriques ambitieux comme sur la figure du milieu. **À Gauche :** Montage interférométrique de type « Sagnac » pour générer des paires de photons intriqués en polarisation [34]. Il s’agit d’un montage que l’on retrouve couramment aujourd’hui dans nos conceptions à base de niobate de lithium. **À Droite :** Étude des possibilités d’ingénierie de l’accord de phase pour obtenir des photons spectralement fins en jouant avec la biréfringence de la fibre et la polarisation des photons [27].

2.2 Manipuler les états quantiques

2.2.1 Connecter ensemble des systèmes quantiques [34,33,29,27,20,5]

À l’impossibilité de copier des états quantiques, nous empêchant de « ré-amplifier » les paires de photons intriqués sur les liens de QKD, la physique quantique propose une alternative : *la téléportation d’intrication*. Le principe revient à connecter ensemble de multiples sources d’intrication afin de former une grande chaîne en répétant le motif présenté sur la Figure 2.8. Un des enjeux majeurs de ce protocole est d’obtenir des interférences à deux photons, également appelées « interférence de Hong, Ou et Mandel » [110]. Le principal défi consiste à assurer l’indiscernabilité des deux particules incidentes sur le dispositif de projection sur un des 4 états de Bell et en particulier de garantir leur synchronisation temporelle.

À ce titre, avec d’autres membres de l’équipe PIQ, je suis propriétaire d’un brevet de

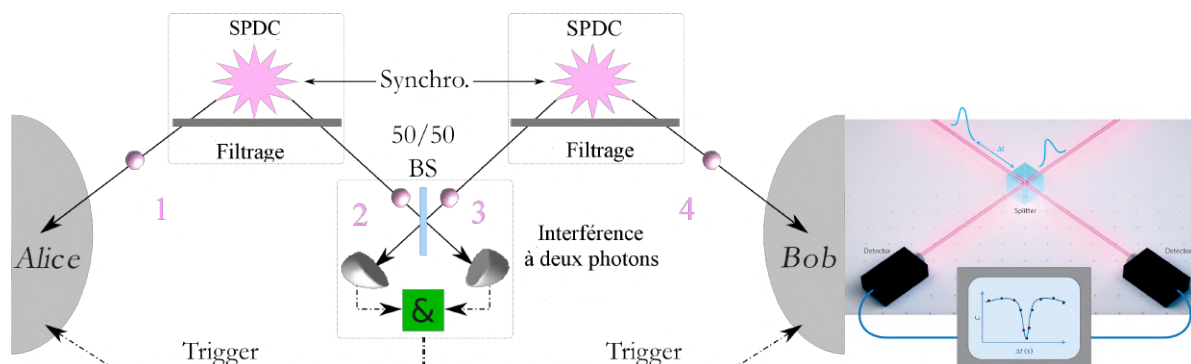


Figure 2.8 – **À gauche** : schéma de principe général d’un relais quantique sur la base de la téléportation d’intrication entre sources indépendantes. L’état quantique associé aux deux photons (« 2 » et « 3 »), issus de deux sources de paires de photons intriqués indépendantes, interfère au niveau d’une station relais de sorte à étendre le lien d’intrication à leurs jumeaux respectifs (photons « 1 » et « 4 »). **À droite** : la clef de réussite de la téléportation d’intrication repose sur un recouvrement (sur toutes les observables) parfait des paquets d’ondes des deux photons se présentant à la lame séparatrice (50/50) afin d’observer une disparition des coïncidences par effet Hong-Ou-Mandel [110].

synchronisation⁵ des sources de lumière quantique déployées sur un réseau de fibres qui s’inspire en grande partie des expériences que j’ai menées sur l’interférence quantique à deux photons entre des sources indépendantes depuis mon post-doctorat à Bristol jusqu’à aujourd’hui.

Le schéma de communication quantique considéré ici est basé sur une configuration de type relais quantique, voir Figure 2.8, où deux photons (« 2 » et « 3 ») issus de deux sources de paires de photons intriqués indépendantes interfèrent au niveau d’une station relais, de sorte à étendre le lien d’intrication à leurs jumeaux respectifs (photons « 1 » et « 4 »). Expérimentalement, la coalescence des photons s’obtient en assurant l’indiscernabilité des deux photons incidents vis-à-vis de leurs différents degrés de liberté (polarisation, longueur d’onde, profil spectral et mode temporel). L’influence de chacun de ces degrés de liberté sur la figure d’interférence à deux photons est à peu près équivalente [111, 112]. Nous nous concentrerons ici sur l’indiscernabilité des modes temporels qui constitue à ce jour la principale difficulté expérimentale. Très concrètement, les incertitudes temporelles liées aux temps de passage des photons sur la lame semi-réfléchissante doivent être négligeables devant la « durée » de la fonction d’onde des photons⁶. En pratique, c’est donc une affaire de compromis entre la précision temporelle et la finesse du filtrage spectral des photons qui entrent en jeu – directement lié à la

5. **WO2013045674A1 : Methode et dispositif de synchronisation de sources d’intrication pour réseau de communication quantique**, S. Tanzilli, V. D’Auria, **O. Alibert**, A. Martin et L. Labonté dont les revenus cumulés sur ces 10 dernières années s’élèvent à 0 €!!!

6. Attention, j’insiste bien que la précision est cruciale mais le temps de passage n’a pas à être identique. Il suffit de lire cet excellent papier de Pittman [113] pour s’en convaincre.

relation temps-fréquence de la transformée de Fourier.

Pour résumer, on peut noter deux approches extrêmes :

1. La méthode la plus intuitive consiste à s'appuyer sur les temps de détection et garantir que les coïncidences qui entrent dans une fenêtre temporelle précise correspondent effectivement à un état bi-photons indiscernables. Il faut donc que le temps de cohérence des photons (i.e. « la taille des photons ») soit plus grand que la précision des détecteurs utilisés. *C'est l'approche démontrée par H. Zbinden et ses collègues à l'université de Genève [114]. Ici, le régime de fonctionnement du laser qui sert à générer les paires de photons est continu, i.e. aucune référence de temps n'est disponible. Les giges temporelles des détecteurs deviennent alors la principale source d'incertitude de plusieurs dizaines de ps. Le prix à payer se situe sur le débit, puisque des filtres de bande passante très étroite, de l'ordre du GHz, doivent alors être employés de sorte à ce que le temps de cohérence des photons (~ 300 ps) soit supérieur à la gigue temporelle des détecteurs. En outre, si le contrôle de la longueur du trajet n'est plus nécessaire, l'indiscernabilité en termes de longueurs d'onde devient ici le point critique sensible à tout décalage des filtres.*
2. Une autre approche consiste à synchroniser les temps d'émission des paires en utilisant deux lasers impulsionnels dans une configuration maître/esclave. Pour relâcher la contrainte sur le filtrage, le régime de pompage devient impulsionnel. Ici, la précision femtoseconde associée à leur instant de création permet de s'assurer un recouvrement parfait lors de leur arrivée sur la lame semi-réfléchissante. Le fait d'utiliser un laser femtoseconde permet réduire l'incertitude sur les temps de création des photons de sorte que le filtrage requis ne soit dans ce cas que de l'ordre du nanomètre et de pouvoir viser des taux de répétition bien au-delà de la centaine de GHz en théorie. *C'est l'approche suivie par l'équipe de A. Zeilinger⁷ et ses collègues à l'université de Vienne [116, 117]. La contrainte se situe maintenant au niveau de la dérive du taux de répétition de la cavité du laser esclave qui doit être asservie sur celle de la cavité du laser maître. Cependant, nous faisons face à deux problèmes : les longueurs des chemins depuis la source jusqu'à la station relais doivent être contrôlées à la dizaine de μm près et au fur et à mesure que nous commençons à séparer les deux lasers, il devient vite pratiquement impossible, au bout d'une dizaine de kilomètres de distance, de maintenir la même dynamique pour les cavités des lasers maître et esclave. Ceci s'explique tout simplement par la vitesse finie du signal électro-optique se propageant dans la boucle de rétroaction entre le maître et l'esclave.*

La première approche est tout à fait d'actualité dans le contexte des mémoires quantiques actuelles qui font partie intégrante du concept de répéteur quantique. En effet, la largeur spectrale des photons, mis en jeu dans les transitions atomiques, vont de quelques

7. et aussi de son ancien doctorant Jian Wei Pan [115]

MHz jusqu'à quelques GHz [118] et remplissent les conditions de l'expérience de Genève avec l'avantage de pouvoir émettre le photon à des instants déterminés. Toutefois, dans un proche futur, la largeur spectrale des photons issus des mémoires quantiques devrait s'élargir pour être comparable à celle des standards des télécommunication, i.e. une centaine de GHz. La seconde approche devient donc intéressante si on trouve une solution au problème de synchronisation des lasers.

Des efforts considérables ont justement été déployés pour résoudre ce problème. Les dernières réalisations expérimentales de synchronisation à distance de lasers introduisent une gigue temporelle supplémentaire due aux modules de conversion électro-optique-électro, généralement de l'ordre de la picoseconde [119], ce qui tend à rayer l'approche #2 des applications en champ réel. *À titre d'exemple, le régime picoseconde a été exploité pour deux réalisations d'un lien de téléportation quantique métropolitain reposant sur une approche hybride opto-électrique à Calgary [120] et à Hefei [121] en 2016. Dans les deux cas, des modulateurs électro-optiques (EOM) associés à des lasers continus sont utilisés pour simuler un régime impulsif picoseconde. Ce système ingénieux permet, grâce à la modulation électro-optique et à une boucle de rétroaction, d'ajuster en temps réel le taux de répétition de l'une des deux sources pour corriger les dérives temporelles engendrées par les fluctuations thermiques liées à l'environnement. Toutefois, cette idée intéressante repose sur une séquence de conversion d'un signal optique vers un signal électrique, ce qui limite fortement les performances temporelles du système. Il faut donc avoir recours à des filtres beaucoup plus fins que le standard des télécommunications. Sun et al [121] ont utilisé des filtres à bande très étroite (4 GHz) pour augmenter le temps de cohérence des photons uniques à 110 ps, ce qui est nettement supérieur aux giges temporelles du système (≤ 6 ps), au détriment de l'efficacité de collection des photons.* En conclusion, si les approches de Calgary [120] et Hefei [121], apportent un éclairage original et intéressant au problème de synchronisation, elles ne font au final pas mieux que l'approche de Genève [114] qui est justement sans synchronisation. Leur approche permet toutefois de relaxer la contrainte sur la qualité (en terme de jitter) des détecteurs utilisés, ce qui s'avère malheureusement de moins en moins contraignant avec les progrès des détecteurs SNSPD dont les jitters flirtent facilement avec les 20 ps en 2024.

Il y a donc une problématique importante à adresser : la durée des impulsions qui joue un rôle central puisque que c'est essentiellement elle qui détermine la précision de synchronisation requise et conditionne le filtrage spectral à appliquer. C'est justement ici que se situe la contribution des papiers [33,29,27,20] dès 2007 puisqu'ils ont permis d'identifier le régime picoseconde comme un compromis vis à vis de la synchronisation des temps d'arrivée (environ quelques mm en termes d'ajustement des distances) et de la stabilisation de la longueur d'onde centrale des filtres (de l'ordre de la centaine de GHz). Nous montrerons surtout en 2020 une solution de synchronisation « parfaite » pour le régime picoseconde (voir Figure 2.10).

[20] **Two-photon interference between disparate sources for quantum networking**, A. R. Mcmillan, L. Labonté, A. S. Clark, B. Bell, A. Martin, O. Alibart, W. J.

Wadsworth, S. Tanzilli and J. G. Rarity, Scientific Reports **3**, 2032 (2013)

[27] **Intrinsically narrowband pair photon generation in microstructured fibres**, A. Clark, B. Bell, J. Fulconis, M. M. Halder, B. Cemlyn, **O. Alibart**, C. Xiong, W. J. Wadsworth and J. G. Rarity, New Journal of Physics **13**, 065009 (2011)

[29] **High-visibility two-photon interference at a telecom wavelength using picosecond regime separated sources**, P. Aboussouan, **O. Alibart**, D. B. Ostrowsky, P. Baldi and S. Tanzilli, Physical Review A **81**, 021801 (2010)

[33] **Quantum interference with photon pairs using two micro-structured fibres**, J. Fulconis, **O. Alibart**, W.J. Wadsworth and J.G. Rarity, New Journal of Physics **9**, 276 (2007)

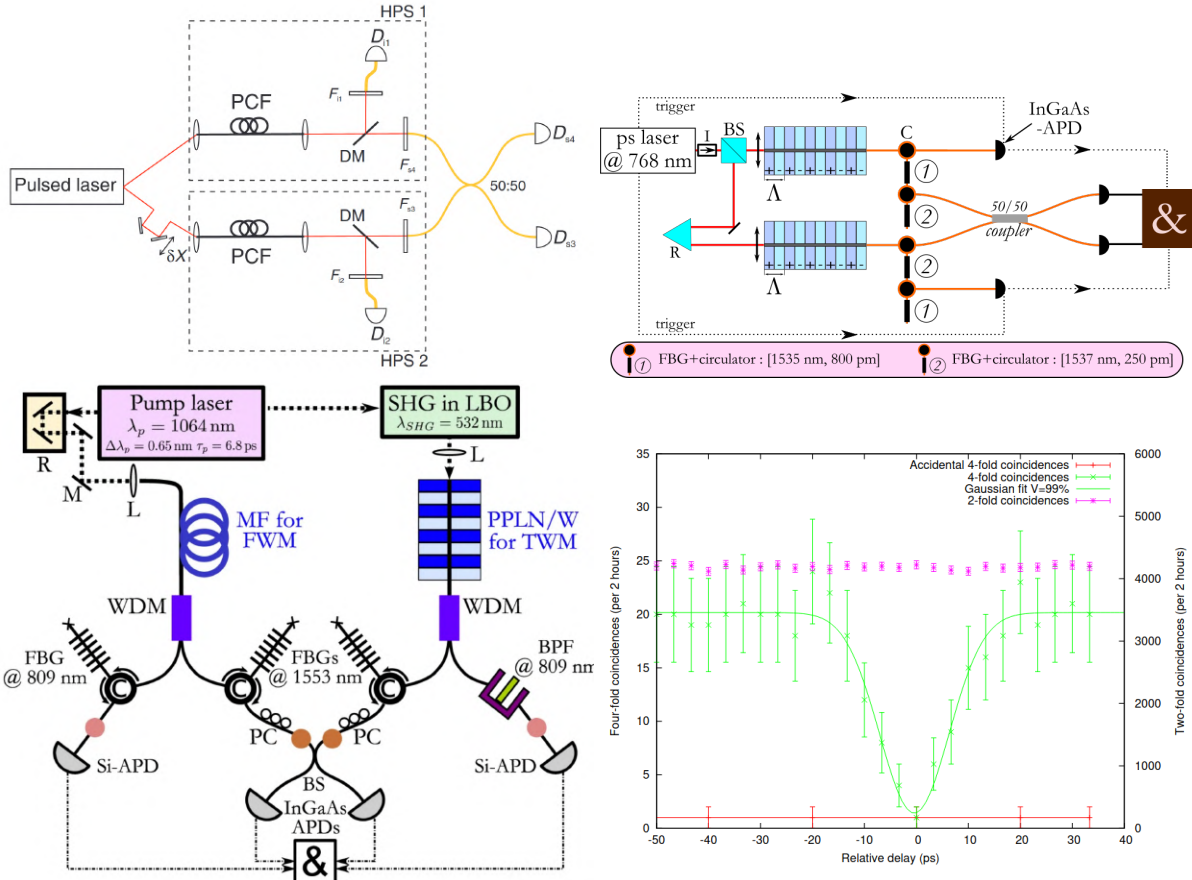


Figure 2.9 – Série d'expériences à base d'interférence à deux photons. Ces expériences de laboratoire exploitent toutes un laser de pompe unique et visent à montrer que le régime picoseconde est un compromis idéal entre synchronisation, ajustement des chemins optiques et filtrage spectral. Il est intéressant de noter que les 2 expériences du haut [33,29] mettent en jeu deux sources identiques (guide PPLN et fibre en silice) tandis que celle du bas [20] exploite une hybridation des deux sources. La signature typique de l'interférence à deux photons est présentée en bas à droite. La visibilité traduisant la « profondeur » du trou dans le nombre de coïncidences en fonction du retard relatif entre les deux photons.

Un grande partie de mon travail de post-doctorat à Bristol et de mes premières années en poste à Nice a concerné la réalisation d'interférences « entre des photons indépendants ». Le terme n'est pas tout à fait correct puisqu'il s'agit d'une interférence à deux photons (et pas de deux photons), donc il faut le voir comme une interférence « à deux photons indépendants ». L'objectif avoué de 2007 à 2010 était d'identifier un régime de fonctionnement qui soit un compromis acceptable entre les régimes femtoseconde [117] et continu [114]. Les trois références [33,29,20] de la Figure 2.9 sont donc relativement identiques puisqu'elles réalisent une expérience en laboratoire exploitant un laser de pompe unique. Elles explorent toutefois ce principe physique avec deux types de sources différentes :

- **Du mélange à 3 ondes** dans ces guides d'onde de niobate de lithium. Un laser à 768 nm pompe deux guides d'onde identiques fournissant des paires de photons identiques à 1535 nm et 1537 nm. L'état quantique constitué des deux photons à 1537 nm interfère sur la lame semi-réfléchissante centrale et conduit à une disparition des coïncidences à la sortie de la lame semi-réfléchissante. Il faut noter ici l'utilisation de filtres avec des largeurs « conventionnelles » pour les standards des télécommunications.
- **Du mélange à 4 ondes** dans deux fibres micro-structurées identiques. Ici c'est un laser picoseconde à 708 nm qui permet d'obtenir des paires de photons à 580 nm et 900 nm pour observer l'interférence à deux photons. À l'instar du travail [35], la longueur d'onde n'est pas optimisée pour les communications longues distances mais la stabilité du montage a permis de valider le régime picoseconde.

L'expérience de la référence [20] est assez spéciale à deux points de vue :

1. Il s'agit d'une collaboration entre l'équipe PIQ et celle de J.G Rarity qui fait suite à mon post-doctorat. Il s'agissait en 2013 de réaliser la toute première expérience entre deux types de sources de paires de photons différentes.
2. Il s'agit de l'expérience fondatrice de l'expérience [5], elle-même à la source du brevet de synchronisation des réseaux de communications quantiques.

Revenons en peu en arrière. Nous sommes en 2006 et jusqu'à présent toutes les réalisations expérimentales d'interférences à deux photons impliquaient des sources de paires de photons strictement identiques alors que la théorie n'impose pas cette contrainte. Les sources développées à Nice reposaient sur du mélange à 3 ondes, tandis que les sources développées à Bristol exploitaient le mélange à 4 ondes. C'était un véritable tour de force puisque la partie pompage des sources a été un vrai casse-tête puisqu'il fallait trouver deux lasers avec un rapport de fréquence double et des sources dont les accords de phase permettaient d'obtenir des paires de photons similaires en termes de longueur d'onde. D'un côté, nous avons choisi un photon à 532 nm pour alimenter le cristal (PPLN) et de l'autre deux photons à 1064 nm pour alimenter la fibre à cristaux photoniques (PCF)

$$\begin{array}{lll}
 \text{PPLN} & 532 \text{ nm} & \rightarrow 1550 \text{ nm} + 810 \text{ nm} \\
 \text{PCF} & 1064 \text{ nm} + 1064 \text{ nm} & \rightarrow 1550 \text{ nm} + 810 \text{ nm}
 \end{array}$$

Chacun de notre côté, nous avons développé une source de paires de photons dont les performances en termes de brillance (puissance requise pour obtenir un nombre de paires de photons suffisant) et les caractéristiques des fonctions d'ondes étaient compatibles avec l'objectif final. Pour cela, nous avons partagé un unique laser à 1064 nm et avons obtenu, via un étage de doublage de fréquence, des impulsions optiques à 532 nm synchronisées avec celles à 1064 nm. Toute la force du concept réside dans le processus d'optique non-linéaire qui n'ajoute aucune gigue temporelle⁸ et permet de maintenir une synchronisation « parfaite » relâchant la contrainte sur le filtrage spectral. Le régime picoseconde a été exploité avec succès et a semé la graine du brevet dédié à la synchronisation des réseaux de communications quantiques.

Compte tenu de toutes les possibilités offertes par l'optique non linéaire (somme de fréquence, différence de fréquence, doublage de fréquence, amplification), nous arrivons au brevet via une question :

Sommes-nous vraiment obligés d'utiliser deux lasers indépendants ? Et si nous pouvions distribuer un laser télécom à tous les utilisateurs et chacun se charge de sa mise en forme en termes de longueurs d'onde et de puissance ?

[5] A universal, plug-and-play synchronisation scheme for practical quantum networks, V. d'Auria, B. Fedrici, L. Arif Ngah, F. Kaiser, L. Labonté, **O. Alibart** and S. Tanzilli, *njp Quantum Information* **6**, 21 (2020)

WO2013045674A1 : Methode et dispositif de synchronisation de sources d'intrication pour réseau de communication quantique, S. Tanzilli, V. D'Auria, **O. Alibart**, A. Martin et L. Labonté

C'est la question à laquelle nous avons répondu en s'inspirant des technologies issues des télécommunications et de l'expérience précédente : pourquoi synchroniser deux lasers indépendants quand nous pouvons distribuer une horloge optique haute cadence sur le réseau ? Est-il possible d'utiliser cette horloge optique de façon astucieuse pour opérer tous les dispositifs qui formeront notre réseau quantique ?

Cette réflexion se superpose avec celle entamée pour la réalisation de sources de paires de photons 100% télécom discutées à la section 2.1.1 et en particulier sur la Figure 2.6 et nous amène à l'article [5] de ma notice bibliographique. Concrètement, nous synchronisons les temps d'arrivée des photons uniques au niveau du nœud relais en distribuant, à travers le réseau, des impulsions de durée de l'ordre de la picoseconde au moyen d'un laser à fibre opérant à la longueur d'onde télécom $\lambda_p = 1540,0 \text{ nm}$. Ce laser agit comme une horloge commune alimentant, à un taux de répétition jusqu'à 10 GHz, des sources indépendantes de paires de photons corrélés (voir Figure 2.10). Toute l'ingéniosité du concept consiste à mettre en forme localement les impulsions reçues pour les adapter

8. Contrairement aux conversion opto-electroniques

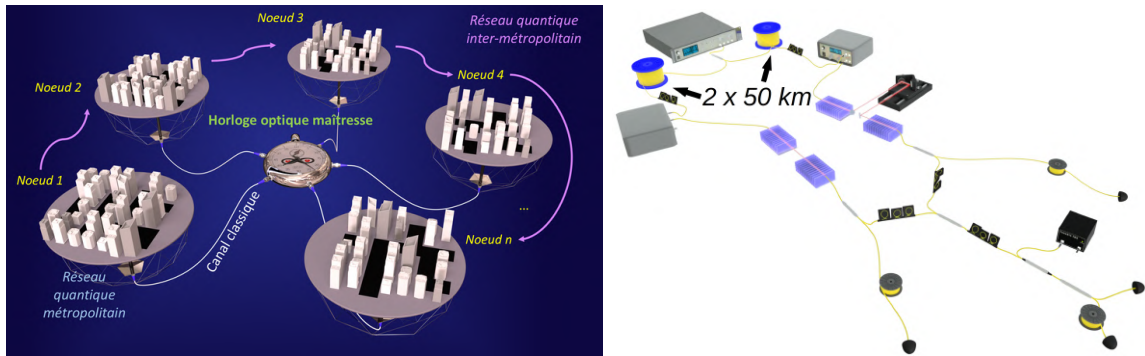


Figure 2.10 – **À droite** : Les impulsions laser de l’horloge optique sont distribuées en parallèle aux différents nœuds du réseau quantique via des canaux optiques classiques. A chacun des nœuds, en fonction de la situation spécifique, les impulsions d’horloge sont localement mises en forme de manière tout optique via des étages d’amplification et d’optique non linéaire et utilisées pour alimenter directement les dispositifs quantiques (génération ou stockage d’intrication) présents au nœud. Ce faisant, les nœuds pilotés par la même horloge optique sont automatiquement synchronisés sans introduction de jitters et sans système de contrôle. **À gauche** : Réalisation expérimentale en laboratoire de synchronisation par horloge optique distribuée de deux sources « indépendantes » en distribuant, à travers le réseau, des impulsions de durée de l’ordre de la ps au moyen d’un laser à fibre opérant à 2,5 GHz. L’observation d’une figure d’interférence à deux photons avec une visibilité supérieure à 95% a validé ce principe de synchronisation.

aux besoins de la source à synchroniser. Par exemple, dans le cas de notre travail, à chaque station, l’horloge maîtresse est tout d’abord amplifiée avant d’être adaptée à la longueur d’onde de 770 nm par génération de seconde harmonique. Enfin, les faisceaux convertis sont utilisés pour pomper en parallèle deux étages de conversion paramétrique spontanée au sein de guides d’ondes inscrits sur niobate de lithium. Ces deux sources de paires de photons sont alors automatiquement synchronisées à distance. Pour démontrer l’applicabilité du concept et l’intérêt du régime picoseconde, nous avons effectué la mesure dans une configuration où 2×50 km de fibre optique ont été insérés en amont de chaque module amplificateur. En ajoutant 100 km de fibre, nous nous sommes donc placés dans une configuration proche d’une « opération longue distance en champ réel » où les temps d’arrivée des impulsions de l’horloge maîtresse sont affectés par des effets de dispersion chromatique et de fluctuations thermiques des fibres optiques. À titre d’exemple, la durée des impulsions d’horloge passerait de 2 ps à 850 ps à cause de la dispersion chromatique sans l’utilisation de modules de compensation de dispersion. Le point le plus critique réside dans la dépendance de l’indice de réfraction de la fibre à la température entraînant une dérive du temps d’arrivée pouvant aller jusqu’à 20 ps par heure. La synchronisation est donc rapidement perdue sans contre-mesure efficace.

Pour mettre en œuvre un système actif de stabilisation de la longueur des fibres, nous avons utilisé les interférences en amplitudes des impulsions d’horloge, mais d’autres tech-

niques issues des méthodes de transfert de temps déployées dans REFIMEVE pourraient répondre à ce besoin. Toujours est-il que ces premières contraintes liées à un déploiement hors laboratoire ont ouvert la voie à notre activité Quantum@UniCA discutée dans la section 2.3.

2.2.2 Circuits photoniques avancés [23,19,14,4]

Les composants d'optiques intégrés jouent un rôle majeur dans les systèmes de communication standard à haut débit. Au cours des deux dernières décennies, ils sont également apparus comme l'une des plateformes clefs à l'avènement des technologies quantiques photoniques. Ils apportent de la compacité, de la stabilité et de l'efficacité permettant de démontrer des dispositifs avec des fonctionnalités inédites. Les solutions photoniques intégrées, jouent le rôle « technologies habilitantes ». Elles stimulent la photonique quantique expérimentale en lui permettant de dépasser la preuve de principe en laboratoire et d'évoluer de sources de photons délicates et fragiles construites à partir d'éléments d'optique massive visés aux tables optiques vers des prototypes compacts, robustes et pratiques sur le terrain. L'effet de levier de l'optique à ondes guidées réside essentiellement dans l'amélioration de l'efficacité des interactions non linéaires optiques et électro-optiques, mais aussi dans la possibilité de fusionner plusieurs fonctions sur une seule puce, ce qui simplifie considérablement la réalisation et l'utilisation de circuits interférométriques.

J'ai développé au cours de ma carrière une expertise en optique intégrée et plus particulièrement sur niobate de lithium. Il s'agit d'un matériau riche puisqu'il dispose de coefficients électro-optiques et optiques non-linéaires très élevés nous autorisant la génération de paires de photons mais également leur manipulation à très haute vitesse. En collaboration avec la plateforme « optique non-linéaire sur niobate de lithium » de l'INPHYNI, j'ai conçu et exploité des dispositifs quantiques qui ont montré un réel apport à l'état de l'art au cours de ma carrière [23,4]. J'ai également été à l'origine de l'hybridation de notre technologie avec d'autres matériaux pour exploiter les atouts de différentes plateformes [19,14]. Nous verrons au cours de cette section, l'évolution et la progression de mes travaux concernant la réalisation de circuits optiques où l'on pourra observer une densification du nombre de fonctions intégrées sur une même puce pour offrir des dispositifs toujours plus avancés et performants.

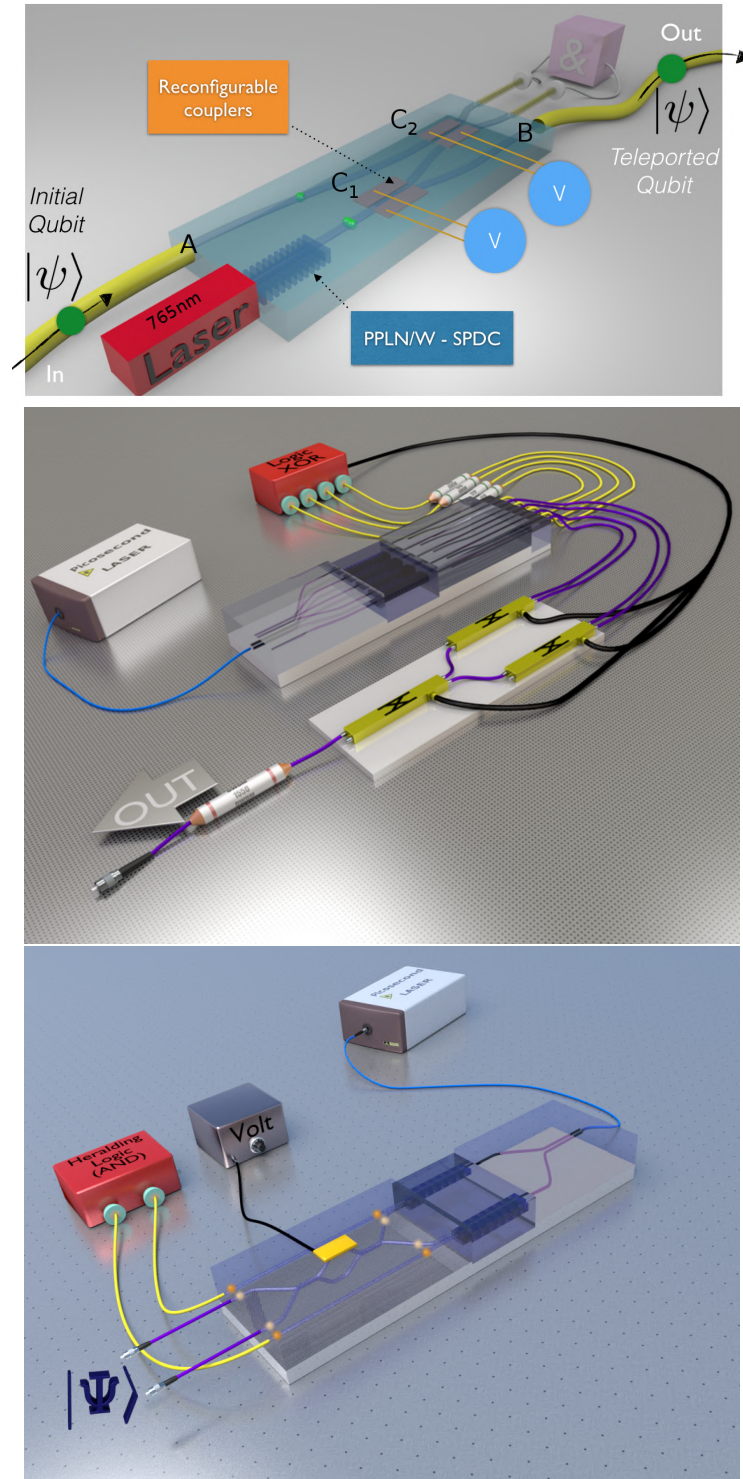


Figure 2.11 – Image du haut : Puce de LiNbO_3 qui effectue l'opération de relais quantique à base de téléportation. Les coupleurs (C_1 et C_2) recouverts d'électrodes de contrôle permettent d'obtenir respectivement la séparation de la paire de photons intriqués et l'interférence à deux photons [23]. **Image du centre :** Puce hybride $\text{SiO}_2+\text{LiNbO}_3+\text{SiO}_2$ qui effectue le (de-)multiplexage de 4 sources de photons uniques annoncés pour une augmentation de la brillance effective [19]. **Image du bas :** Puce hybride $\text{SiO}_2+\text{LiNbO}_3+\text{SiO}_2$ qui effectue l'annonce d'états intriqués. Ce sont ici les guides d'ondes en 3D inscrits par faisceau laser qui offrent des solutions de routages innovantes [14].

- [23] **A quantum relay chip based on telecommunication integrated optics technology**, A. Martin, **O. Alibart**, D. B. Ostrowsky, M. P. De Micheli and S. Tanzilli, *New Journal of Physics* **14**, 025002 (2012)
- [19] **Hybrid photonic circuit for multiplexed heralded single photons**, T. Meany, L. Arif Ngah, M. J. Collins, A. S. Clark, R. J. Williams, B. J. Eggleton, M. J. Steel, M. J. Withford, **O. Alibart** and S. Tanzilli, *Laser & Photonics Reviews* **8**, L42–L46 (2014)
- [14] **On-chip generation of heralded photon-number states**, P. Vergyris, T. Meany, T. Lunghi, G. Sauder, J. Downes, M. J. Steel, M. J. Withford, **O. Alibart** and S. Tanzilli, *Scientific Reports* **6**, 35975 (2016)
- [4] **Configurable heralded two-photon Fock-states on a chip**, X. Hua, T. Lunghi, F. Doutre, P. Vergyris, G. Sauder, P. Charlier, L. Labonté, V. D'Auria, A. Martin, S. Tascu, M. P. De Micheli, S. Tanzilli, and **O. Alibart**, *Optics Express* **29**, 415–424 (2021)

Chronologiquement, il faut revenir en 2004 (section 2.1.1) et comprendre que l'idée de séparer les deux photons à même la puce (pour optimiser les couplages de chaque photon indépendamment) n'a pas mis longtemps à germer dans nos têtes.

Alors pourquoi autant de temps pour voir les premières démonstrations d'optique intégrées sur puce ? Il faut bien comprendre que le processus de fabrication de circuits optiques fonctionne en N étapes consécutives (lithographie, dépôt métal, gravure, lithographie, dépôt isolant, polissage...) et que chacune des étapes est associée à un taux de succès p et donc que le taux de succès final est proportionnel à $p^N \ll 1$! On devine aisément que la réalisation d'une puce comme celle de l'article [4] est le fruit de longues années d'amélioration, de fiabilisation et de reproductibilité des protocoles d'inversion de la polarisation spontanée du niobate de lithium, de fabrication de guide, de dépôt d'électrodes. C'est justement ici que je rends hommage à la plateforme OPTINIL et en particulier au travail de M. De Micheli et aujourd'hui de F. Doutre : sans votre abnégation tout cela aurait été impossible !

En regardant la puce [23] du haut sur la Figure 2.11, nous apercevons une puce 100% LiNbO₃ qui incorpore une zone non-linéaire et deux coupleurs ajustables électro-optiquement. Cette réalisation était réellement novatrice en 2012 puisque les seules puces concurrentes n'étaient qu'un enchevêtrement de guides entièrement passifs [122, 123]. C'est d'ailleurs la force du niobate de lithium qui possède des coefficients linéaires optique-optique et aussi électro-optiques, offrant une multitude de combinaisons pour générer, manipuler (rapidement) les photons. La puce réalisait l'opération de relais quantique en se basant sur le concept de téléportation. Il ne faut pas retenir les performances brutes en termes de comptage de photons⁹ mais la toute première réalisation au monde de génération d'intrication et d'interférence à deux photons sur quelques cm² !

Comme expliqué ci-dessus, l'intégration d'un plus grand nombre de fonctions optiques complémentaires entraîne des procédures de fabrication difficiles, notamment lorsque des

9. Les coïncidences à trois photons se faisaient avec des détecteurs affichant 10% d'efficacité...

approches monolithiques sont employées. Les dispositifs photoniques hybrides sont apparus comme une solution aux défis de l'intégration monolithique en combinant des composants optimisés pour leur fonction individuelle. J'ai initié cette approche en collaboration avec le groupe de M.J. Steel et M.J. Withford à l'université de MacQuarie (Sydney) en 2013. Nous avons combiné des guides d'ondes en niobate de lithium à des circuits optiques dynamiquement reconfigurables inscrits par écriture directe par laser femtoseconde (FLDW) sur verre [124]. En suivant cette approche, nous avons réalisé les

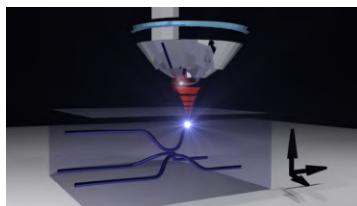


Figure 2.12 – Capacité d'écriture de circuit 3D à l'aide de faisceau laser femtoseconde tel que maîtrisée par l'université de MacQuarie en Australie. Ici réalisation d'un tritter issu de la référence [124]

deux références [19,14] visibles sur le milieu de la Figure 2.11. Il s'agissait d'un dispositif capable de (de-)multiplexer 4 sources de photons uniques annoncées¹⁰ afin d'augmenter la brillance apparente, tandis que la seconde [14] était largement plus ambitieuse expérimentalement puisqu'un contrôle dynamique (certes très lent $\leq \text{kHz}$) était possible et qu'il s'agissait de mesurer des coïncidences à quatre photons afin d'observer l'interférence à deux photons sur puce.

Il y a deux points que je voudrais mettre en avant ici :

1. Je précise que seule l'optique intégrée nous a donné les garanties de part sa stabilité et l'efficacité des générateurs de photons de tenter une expérience aussi compliquée avec des détecteurs dont les efficacités avoisinaient les 10%. *Il faut bien comprendre que chaque fois que deux paires sont générées, ce qui arrive une fois sur 100 en moyenne, les détecteurs ont une chance sur mille de « voir les quatre photons ». Cela fait très peu d'évènements conclusifs...*
2. Il faut regarder en détail sur la puce du bas de la Figure 2.11 l'agencement en 3D des guides inscrits dans la silice. C'est ici que rentre en jeu le potentiel des guides inscrits par faisceau laser pour obtenir un interféromètre de type Mach-Zehnder dont la phase relative est pilotable grâce au gradient de température entre la surface supérieure et inférieure du verre.

Depuis, plusieurs plateformes ont connu un succès notable dans la construction de sources efficaces et polyvalentes d'intrication photonique associées à des circuits complexes comportant de nombreux composants linéaires sur le même substrat [1]. Parmi

10. la fameuse séparation des photons signal et idler sur puce rêvée en 2004

les plates-formes matérielles disponibles, la photonique au silicium [125] et [10,6] a récemment attiré l'attention pour son facteur de densité d'intégration supérieure¹¹. Il faut également noter la montée en puissance de la plateforme des semi-conducteurs III-V [61, 62, 63] pour leur technologie de fabrication mature, la possibilité d'intégrer des lasers et des détecteurs supraconducteurs pour la détection sur puce. C'est d'ailleurs le point faible des guides d'ondes « historiques » sur niobate de lithium dont l'empreinte spatiale d'une fonction optique (zone non-linéaire, coupleur, filtre...) occupe généralement près d'un centimètre en terme de longueur. Les choses sont entrain de changer avec l'essor des films minces de niobate de lithium [126, 127] qui reprennent l'avantage : le mélange spontané à trois ondes dans des structures encore plus compactes offre une brillance inégalée, une réjection de la pompe facilitée et enfin des fréquences de modulation électro-optique à plus de 100 GHz [128]. Ce retour en force du niobate de lithium nous offre des perspectives de recherche nouvelles que nous discuterons dans la section 2.3.2. Toujours est-il qu'en 2021, notre relais quantique [23], avait presque atteint les limites de fabrication sur une puce de 3 cm. En 2021, nous avons poussé au maximum les techniques de fabrication pour réaliser le plus grand nombre de fonctions intégrées sur une puce de LiNbO_3 [4]. Le record était co-détenu avec une équipe de l'université de Nanjing [129] mais nous avons réalisé une expérience bien plus complexe puisqu'elle impliquait la mesure de 4 photons. Il s'agit en fait de la version monolithique de notre puce de l'article [14]. En pratique, nous avons montré la manipulation dynamique de l'état quantique d'une paire de photons annoncés. En pratique, un signal électrique annonce l'émission d'une paire de photons dont l'état quantique peut être ajusté (via une modulation électro-optique de quelques volts) depuis un état produit : $|1\rangle|1\rangle$ (image de gauche sur Figure 2.13) à un état intriqué de type N00N : $|2\rangle|0\rangle + |0\rangle|2\rangle$ (image de droite sur Figure 2.13) qui ne donne aucune coïncidence. Ce qu'il faut retenir ici, c'est encore une fois la brillance qui nous a permis de réaliser cette expérience en injectant quelques μW de pompe en régime picoseconde, la capacité de modulation à haute fréquence et surtout la possibilité de faire tenir sur une puce de quelques mm^2 la même expérience que celle discutée dans l'article [29]. Cette puce est une véritable salle d'expérience à elle toute seule !

11. malgré l'absence de coefficient électro-optique naturel conduisant à une modulation optique lente par chauffage local

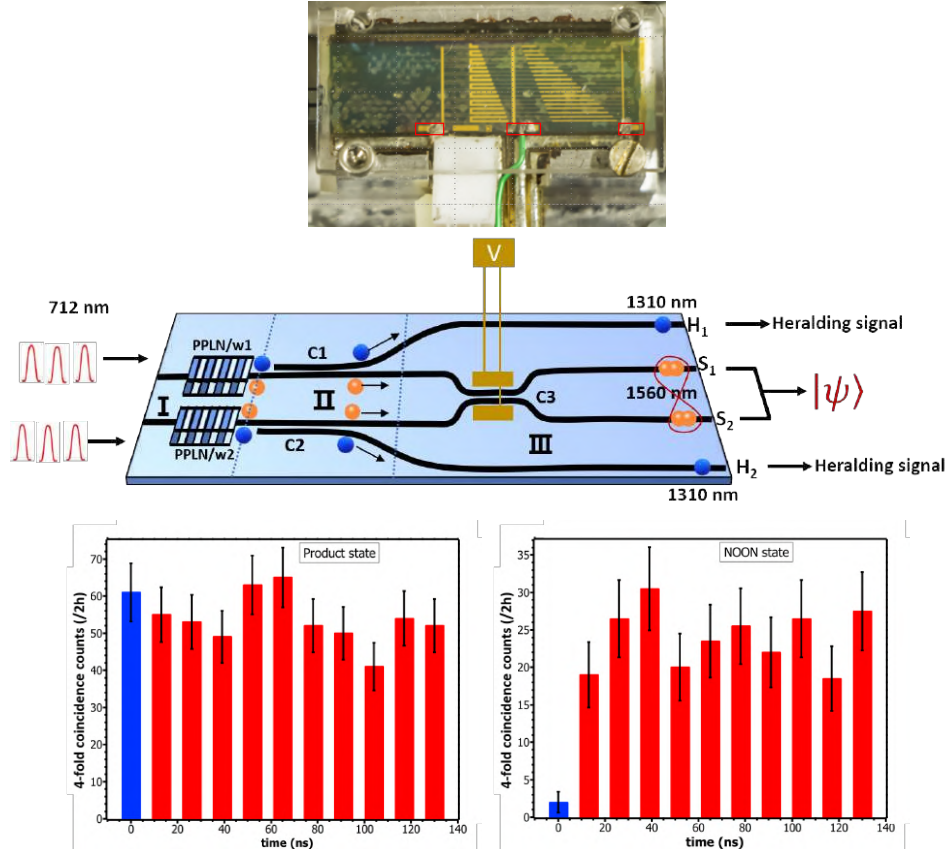


Figure 2.13 – **En haut** : Puce de LiNbO₃ monolithique (et sa photo) qui effectue la génération d'états quantiques à deux photons dont l'état est continûment ajustable de séparable à intriqué via l'application d'une tension ≤ 10 V[4]. Elle intègre deux zones non-linéaires pour la génération simultanée de deux paires de photons, suivies de coupleurs directionnels (C1, C2 et C3) ajustables (pour des raisons pédagogiques un seul coupleur est représenté avec des électrodes mais en pratique tous l'étaient). Il s'agit du plus grand nombre de fonctions optiques regroupées sur une puce de LiNbO₃. **En bas** : mesure des quadruples coïncidences en sortie de la puce permettant d'identifier la production d'un état produit ou d'un état intriqué de type NOON. Encore un fois ici, il faut souligner le courage du doctorant qui utilisait des détecteurs avec 10% d'efficacité. Une telle mesure requiert une stabilité sur plus de 24 h qui est garantie grâce à l'optique intégrée.

2.2.3 Transposition en fréquence [11,38]

[38] **A photonic quantum information interface**, S. Tanzilli, W. Tittel, M. Halder, O. Alibart, P. Baldi, N. Gisin and H. Zbinden, *Nature* **437**, 116-120 (2005)

[11] **Quantum optical frequency up-conversion for polarisation entangled qubits : towards interconnected quantum information devices**, F. Kaiser, P. Vergyris, A. Martin, D. Aktas, M. P. de Micheli, O. Alibart and S. Tanzilli, *Optics Express* **27**, 25603–25610 (2019)

Dans la vision d'un grand internet quantique, i.e. qui reliera des dispositifs quantiques (ordinateurs, capteurs ...), les photons sont les porteurs privilégiés de l'information quantique. Elle ne dépend pas du système physique qui la porte, on dit qu'elle est fongible. Il est donc possible de transférer l'état quantique, porté par un photon, sur un électron ou un atome [130, 131]. Dans le cas du transfert d'un photon sur un autre photon, c'est par exemple la téléportation que nous avons vu à la section 2.2.2 précédente. L'un des principaux obstacles à la connexion de divers systèmes quantiques réside toutefois dans l'écart de longueur d'onde qui peut exister entre les différents systèmes. Par exemple, les photons qui voyagent sont généralement choisis aux longueurs d'onde des télécommunications ($\lambda \sim 1550$ nm). D'autre part, les tâches de calcul quantique, de stockage et de métrologie sont généralement réalisées avec des systèmes basés sur la matière qui interagissent avec des longueurs d'onde allant du visible au proche infrarouge ($\lambda \sim 600$ -900 nm). Pour combler ce fossé, la solution réside dans des interfaces quantiques capables de convertir de manière cohérente les photons entre les différentes bandes de longueur d'onde.

Les deux références [38,11] concernent la transposition en fréquence de photons en maintenant les propriétés quantiques de l'état. Ce travail permet donc de démontrer la fongibilité de l'information quantique qui signifie, en d'autres termes, que les caractéristiques quantiques d'une observable (la valeur du qbit) peuvent être transférées d'un porteur à un autre sans altération de la cohérence. Pour les deux expériences, c'est réellement l'efficacité des guides d'ondes non-linéaires fabriqués à l'INPHYNI qui a contribué significativement à la démonstration expérimentale. Il est intéressant de noter dans la référence [38] que la cohérence est assurée par la grande cohérence spectrale du laser de pompe tandis que dans la référence [11], c'est la stabilité de montage interférométrique (Mach-Zehnder) qui est la clef de voûte de la préservation de la cohérence. Dans le cadre de cette preuve de principe, les efficacités ne sont pas significatives (entre 5% et 50% respectivement) mais il faut savoir qu'aucune limite fondamentale interdit d'atteindre 100%. Le critère important ici sont les fidélités qui, dans les deux cas, ont dépassé 95%.

Ces types d'interfaces se sont démocratisés pour convertir efficacement les sources de photons uniques à base de semi-conducteur à 900 nm vers les longueurs d'onde des télécommunications [85, 132, 133] et sont certainement les futurs éléments clefs sur lesquels il faudra compter pour la démonstration d'un maillon élémentaire d'internet

quantique hors du laboratoire dans la section 2.3.2.

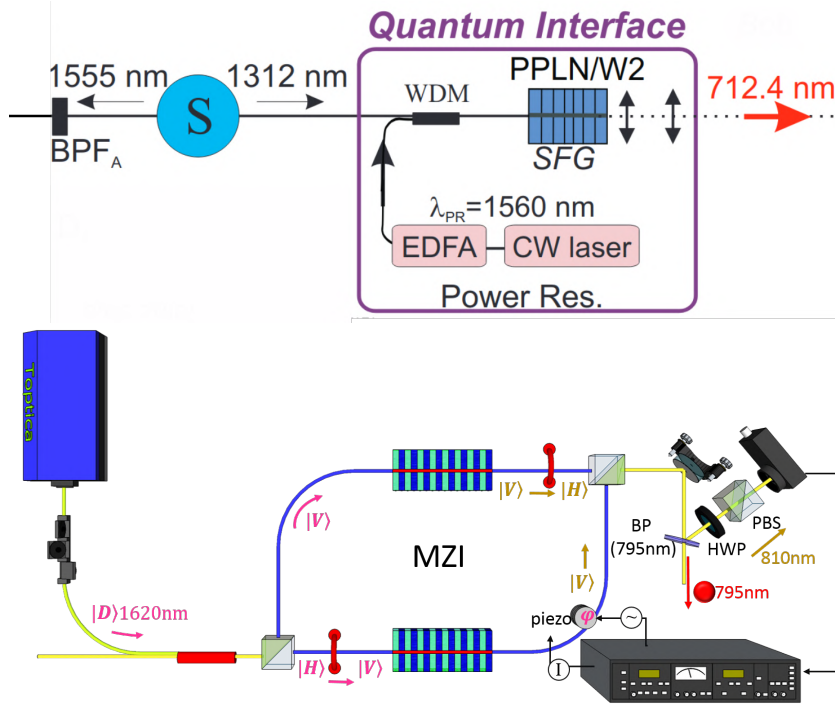


Figure 2.14 – Deux interfaces de conversion de longueurs d’onde qui préservent respectivement l’intrication énergie-temps [38] et la polarisation [11]. Il est intéressant de noter dans la référence [38] que la cohérence est assurée par la grande cohérence spectrale du laser de pompe tandis que, dans la référence [11], c’est la stabilité de montage interférométrique (Mach-Zehnder) qui est la clef de voûte de la préservation de la cohérence. Dans les deux cas, c’est réellement l’efficacité des guides d’ondes non-linéaires fabriqués à l’INPHYNI qui a joué un rôle « habilitant ». Des stabilités remarquables pendant plusieurs heures ont contribué à l’obtention de fidélités supérieures à 95% .

2.3 Des expériences en champ réel

2.3.1 Big Bell test [13]

[13] **Challenging local realism with human choices**, The BIG Bell Test Collaboration : C. Abellán, A. Acín, A. Alarcón, **O. Alibart**, C. K. Andersen, F. Andreoli, A. Beckert, F. A. Beduini, A. Bendersky, M. Bentivegna, P. Bierhorst, D. Burchardt, A. Cabello, J. Cariñe, S. Carrasco, G. Carvacho, D. Cavalcanti, R. Chaves, J. Cortés-Vega, A. Cuevas, A. Delgado, H. de Riedmatten, C. Eichler, P. Farrera, J. Fuenzalida, M. García-Matos, R. Garthoff, S. Gasparinetti, T. Gerrits, F. Ghafari Jouneghani, S. Glancy, E. S. Gómez, P. González, J.-Y. Guan, J. Handsteiner, J. Heinsoo, G. Heinze, A. Hirschmann, O. Jiménez, F. Kaiser, E. Knill, L. T. Knoll, S. Krinner, P. Kurpiers, M. A. Larotonda, J.-Å. Larsson, A. Lenhard, H. Li, M.-H. Li, G. Lima, B. Liu, Y. Liu, I. H. López Grande, T. Lunghi, X. Ma, O. S. Magaña-Loaiza, P. Magnard, A. Magnoni, M. Martí-Prieto, D. Martínez, P. Mataloni, A. Mattar, M. Mazzeza, R. P. Mirin, M. W. Mitchell, S. Nam, M. Oppliger, J.-W. Pan, R. B. Patel, G. J. Pryde, D. Rauch, K. Redeker, D. Rieländer, M. Ringbauer, T. Roberson, W. Rosenfeld, Y. Salathé, L. Santodonato, G. Sauder, T. Scheidl, C. T. Schmiegelow, F. Sciarrino, A. Seri, L. K. Shalm, S.-C. Shi, S. Slussarenko, M. J. Stevens, S. Tanzilli, F. Toledo, J. Tura, R. Ursin, P. Vergyris, V. B. Verma, T. Walter, A. Wallraff, Z. Wang, H. Weinfurter, M. M. Weston, A. G. White, C. Wu, G. B. Xavier, L. You, X. Yuan, A. Zeilinger, Q. Zhang, W. Zhang, J. Zhong, *Nature* **557**, 212–216 (2018)

La référence [13] concerne l'expérience « The Big Bell Test » mise en place par l'Institut des Sciences Photoniques de Barcelone, rassemblant douze laboratoires sur cinq continents, dont l'Institut de Physique de Nice. Elle est intéressante à plusieurs points de vue :

- Elle permet de répondre à une question fondamentale concernant la non-localité de la théorie quantique.
- Elle a requis un effort technique important dans la conception d'une source de paires de photons pour répondre à un cahier des charges proche d'une expérience en champ réel.
- Elle est l'exemple même d'une expérience participative qui permet de promouvoir la recherche fondamentale auprès du public.

Les corrélations quantiques sont beaucoup plus fortes que les classiques, c'est ce qu'atteste la violation des inégalités de Bell qui remet indéniablement en question toute théorie de réalisme local [15]. Cependant, l'utilisation de dispositifs physiques pour choisir les paramètres dans un test de Bell fait inévitablement des hypothèses sur la physique même que l'on cherche à éprouver. Bell lui-même a noté cette faiblesse des choix de paramètres

physiques et a fait valoir que le « libre arbitre » humain pourrait être utilisé de manière rigoureuse pour assurer l'imprévisibilité des tests de Bell [134].

Pour tester cette hypothèse, une collaboration internationale rassemblant douze laboratoires a mené une expérience de sciences participatives inédite. Plus de 100 000 personnes (les « Bellsters ») dans le monde, rassemblées au travers d'un jeu vidéo, ont généré 97 347 490 choix aléatoires, qui ont été dirigés vers les 13 expériences qui ont testé le réalisme local sur une période continue de 24 heures le 30 novembre 2016. Ces données correspondaient environ à un flux soutenu de plus de 1000 bits/s que les expériences ont dû utiliser pour choisir chaque paramètre de mesure. Pour la démonstration d'un tel test de Bell, nous avons besoin d'une source d'intrication (et de son système d'analyse) fiable et de grande qualité capable de fonctionner pendant 24 heures, d'assurer une commutation rapide entre les réglages « 0 » et « 1 » pour les analyseurs d'Alice et de Bob et des capacités d'acquisition rapide des données.

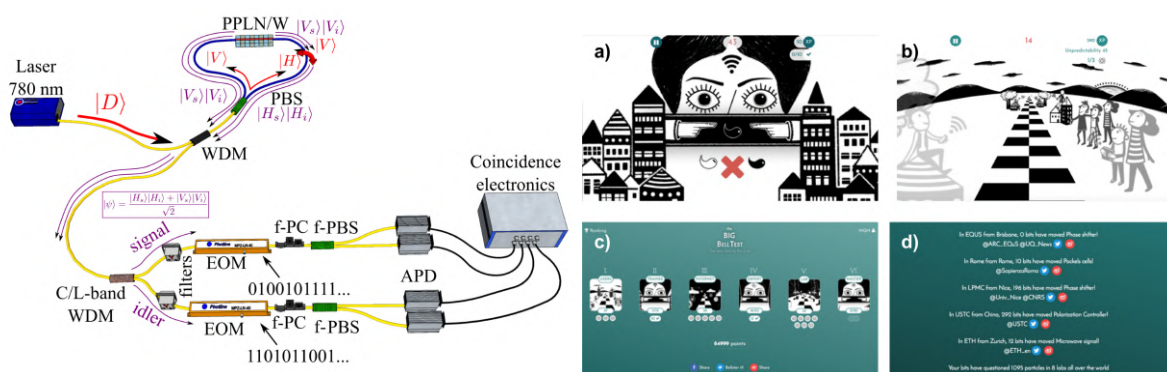


Figure 2.15 – À gauche : Source de paires de photons intriqués en polarisation et énergie-temps pompée par un laser continu à 780nm. Les états de polarisation des photons du signal et de l'idler sont chacun analysés par un ensemble modulateur électro-optique (EOM) et séparateur de polarisation à fibre (f-PBS) qui font office d'interféromètre déséquilibré à la Franson [135, 136]. À droite : Exemples de jeux vidéo disponibles sur smartphone et ordinateur (a,b et c) et la diffusion sur les réseaux sociaux (d)

Ce qui est notable avec cette expérience, c'est qu'au-delà de son aspect fondamental, elle introduit les premières contraintes liées au déploiement hors laboratoire. En effet, pour respecter les critères de libre arbitre, il fallait traiter les choix des joueurs, environ 1 kbit/s, à la volée. Il a donc fallu mettre en place un choix d'observable dicté par des contraintes expérimentales. L'ingéniosité que nous avons déployée pour faire fonctionner rapidement le système repose sur l'exploitation d'une source de type Sagnac (voir Figure 2.15) qui produit des paires de photons intriqués non seulement en polarisation mais en énergie-temps. Si nous avions utilisé une source d'intrication en polarisation seule, la vitesse de bascule entre deux bits aléatoires reçus des « Bellsters » pour l'analyse de l'intrication aurait été limitée par la vitesse de rotation des analyseurs de l'ordre

de quelques Hertz. Si nous avons utilisé une source d'intrication en énergie-temps, la vitesse de bascule entre deux bits aléatoires reçus des « Bellsters » pour l'analyse de l'intrication aurait été limitée par la vitesse du modulateur de phase fibré à quelques centaines de Hertz sans parler du besoin de stabiliser les interféromètres d'analyse. Toute la beauté du montage consiste à exploiter une configuration hybride de l'intrication en énergie-temps et en polarisation [137] qui nous permet d'utiliser des modulateurs électro-optiques biréfringents capables de moduler la phase des analyseurs dans le régime du kHz. Avec une telle approche, nous avons un double gain : une grande rapidité dans la commutation des choix de base chez Alice et Bob et aucune contribution de photons ne doit être rejetée, ce qui réduit nos pertes globales de 50% [138].

Durant la totalité de l'expérience qui a commencé le 30.11.2016 à 11h09 et s'est terminée le 01.12.2016 à 12h10, nous avons montré sans ambiguïté une violation de l'inégalité standard de Bell de plus de 143 écarts-types. Nous avons consommé 39.10^6 bits aléatoires générés par des humains ce qui fait de cette expérience participative une claire démonstration de la non-localité de la théorie quantique.

2.3.2 Réseau de communication quantique

Quantum@UniCA [2,3]

Dans cette partie, nous allons aborder les expériences en dehors du laboratoire qui s'appuient sur tout le travail présenté dans les sections précédentes. Ces activités adressent aux défis identifiés en section 1.3.1. Cette partie couvre mes activités de recherche actuelles ainsi que celles à venir.

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 manipuler et analyser les observables choisies. Nos laboratoires sont des bulles privilégiées, à l'abri desquelles de nouveaux protocoles tels que la distribution quantique de clés ou la téléportation quantique d'état, ont pu émerger depuis une trentaine d'années. Toutefois, ces protocoles n'ont pas vocation à y rester confinés. Les chercheuses et les chercheurs 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, et capables d'auto-diagnostiquer des défaillances et de redémarrer seuls. Sacré cahier des charges auxquelles s'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. Ce sont ces aspects que nous allons aborder dans cette section.

Bien évidemment, la compacité et la praticité des dispositifs quantiques (sources, analyseurs,...) à base de composants d'optique guidée offrent naturellement un support concret aux envies d'expériences hors du laboratoire, c'est-à-dire en « champ réel ». Mais c'est également toutes les compétences expérimentales (interférométrie, stabilisa-



Figure 2.16 – Q@UniCA : Il s’agit d’un réseau de fibres optiques dédiées aux expériences de communication quantique. Ces fibres ne transportent aucun autre type de signal optique que des états quantiques. 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 Caussols est connecté au télescope d’observation astronomique pour préparer les futurs liens spatiaux par satellite.

tion, détections de photon,...) et théoriques (protocoles de communication quantique, interférence à deux photons, téléportation quantique,...) que nous avons accumulées pendant des années qui nous ont permis de partir confiants dans cette aventure.

Dès 2019, de façon concomitante avec l’éclosion des « technologies quantiques », une initiative soutenue par l’Université Côte d’Azur et ORANGE prévoyait de déployer un lien fibré dédié à la réalisation d’expériences de communication quantique entre différents sites de l’université. Cette infrastructure constitue un véritable « banc de test ¹² » 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 Caussols. Il nous permet d’éprouver nos dispositifs quantiques mais aussi d’explorer les nouveaux besoins et lever les verrous technologiques pour sortir les technologies quantiques des laboratoires.

Il faut noter que ce réseau est unique en Europe puisqu’il connecte plusieurs sites métropolitains à une station optique sol ce qui permet d’envisager des liens satellitaires.

12. Avec le lien Paris QCI, également déployé en région Parisienne, ce lien est également le premier réseau quantique déployé en France.

Les axes de recherche s'inscrivent donc dans une démarche multi facettes :

- **Défi #1** : Il faut développer des dispositifs quantiques (sources, analyseurs...) innovants adaptés au fonctionnement hors labo (salle serveur ou table optique perchée au sommet d'une montage alimentée par des batteries sur panneaux solaires...).
- **Défis #2 & 3** : C'est l'occasion de mettre en œuvre des solutions innovantes de stabilisation des analyseurs et de synchronisation qui ne sont pas triviales lorsque le flux de photons est de quelques dizaines de coïncidences par seconde.
- **Défi #4** : C'est la cadre idéal pour mesurer le surcoût nécessaire en communication classique pour faire fonctionner ces protocoles quantiques et adresser la co-habitation des communications classiques et quantiques sur le même support et mettre en œuvre des solutions de multiplexage (spatial, temporel ou spectral).
- **Défi #5** : C'est aussi un banc de test pour innover et éprouver la faisabilité de nouvelles applications comme un logiciel de visio-conférences ou stockage sur cloud chiffrés grâce à des clefs d'origines quantiques.

Défi #1 : Dispositifs quantiques

Avec des objectifs à moyen terme clairement établis en direction d'applications sur le réseau quantique, le premier axe de recherche consiste à maintenir une activité riche concernant l'étude de sources innovantes dans différents matériaux pour répondre aux besoins des communications quantiques. Il s'agit donc de développer des sources de paires de photons intriqués mais aussi des sources de photons uniques qui exploitent les connaissances développées au cours de ma carrière et dont les propriétés permettent de répondre aux besoins des expériences hors laboratoire. Je conduis actuellement le développement de 4 sources à des degrés de maturité différents et il sera intéressant de mettre en avant les liens avec mes activités de recherches antérieures.

Sources de paires de photons

Chronologiquement, pour démarrer le projet Q@UniCA, nous avons cherché à développer la source d'intrication et ses analyseurs dont la fiabilité est éprouvée. Un simple guide PPLN et un laser cohérent à 780 nm permettent d'obtenir des paires de photons intriqués en énergie-temps et leur analyse requiert des interféromètres de type Franson dont l'équipe est experte en termes de développement et manipulation. Le principe de la source est montré sur la Figure 2.17 et s'inspire des articles [21]. Ce type de source génère des paires de photons sur un spectre de plus de 80 nm de large et permet de proposer une distribution d'intrication multiplexée en longueur d'onde comme nous l'avons montré dans la référence [139]. Le principal objectif que nous nous sommes fixé (au-delà de l'évidente qualité d'intrication) concerne le nombre de paires générées par fenêtre d'analyse temporelle des coïncidences. Une simulation du taux de clefs secrètes en fonction du nombre moyen de paires pour le lien de 50 km montre qu'il faut environ $\sim 0,05$ paire par fenêtre de 150 ps et par canal spectral. Le terme « nombre moyen » tra-

duit bien ici une distribution statistique des paires et le point idéal est un compromis entre « maximiser » le nombre de paires uniques tout en s'assurant de ne pas générer trop de doubles paires qui induisent des erreurs et font chuter le taux de clefs secrètes comme présenté sur la Figure 2.17. En termes de chiffre, nous avons donc estimé un besoin aux alentours de $6 \cdot 10^6$ dans un canal ITU de 100 GHz. En pratique, il y a eu un grand travail d'intégration pour rendre le dispositif autonome et pilotable à distance qui est visible sur la Figure 2.18, mais c'est réellement la brillance des guides PPLN qui nous permet d'atteindre le nombre moyen de paires de photons idéal pour seulement 10 mW de puissance de pompe à 780 nm.

Les qualités optiques et quantiques de la source ont été mesurées et validées par l'expérience de QKD publiée dans la revue Physics Review Applied [2]

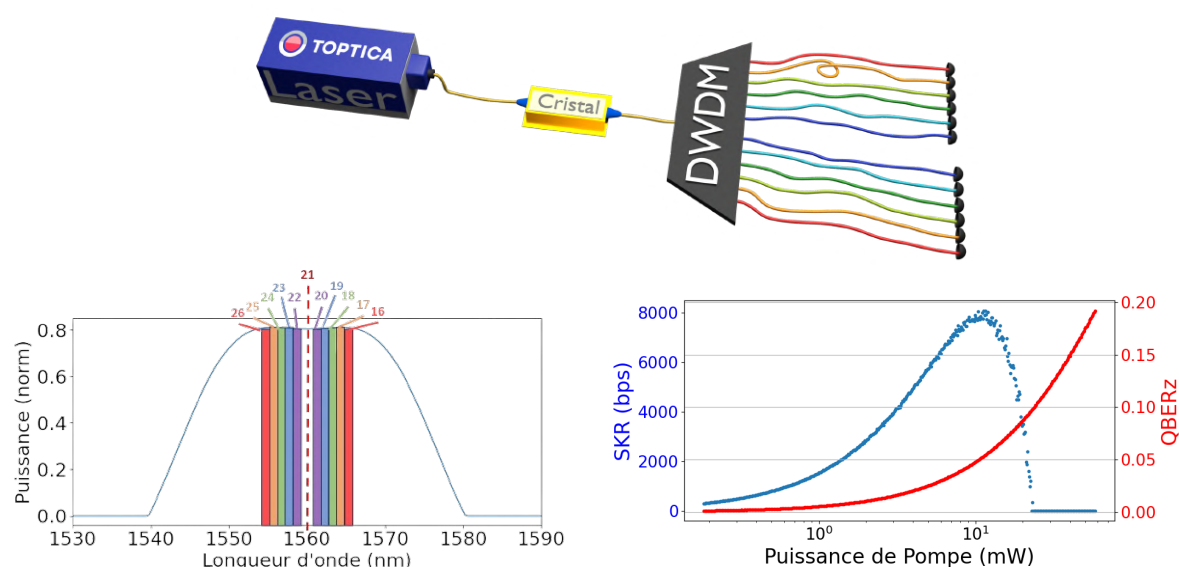


Figure 2.17 – En haut : Principe de la source d'intrication en énergie-temps large bande.

En bas : Principe du multiplexage des bandes spectrales corrélées pour la QKD multi-canal et simulation du taux de clefs secrètes en fonction du nombre moyen de paire par fenêtre d'analyse. En pratique, c'est la puissance de pompe qui est indiquée sur l'axe des abscisses car elle permet d'ajuster le cahier des charges lors de la conception de la source et il est intéressant de noter qu'on atteint le régime optimal ($\sim 0,05$ paire par fenêtre de 150 ps dans chaque canal spectral) pour 10 mW.

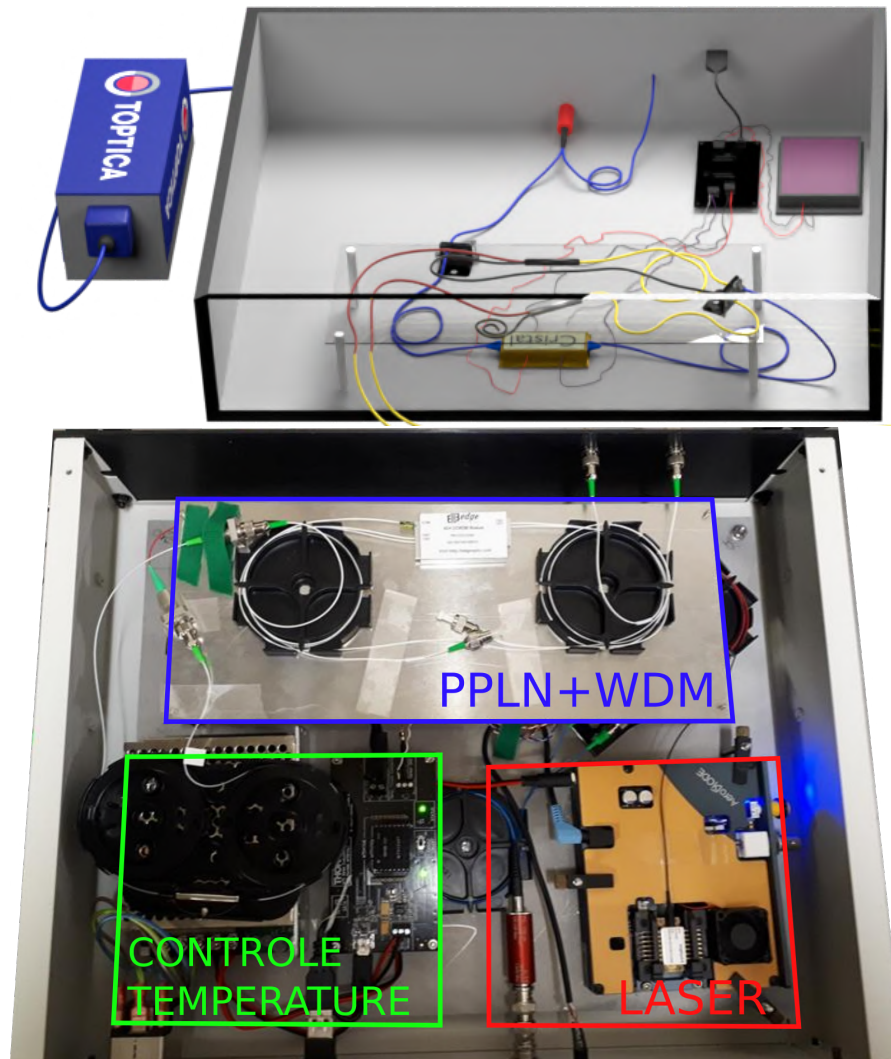


Figure 2.18 – Source d'intrication en énergie temps pour la QKD. Du concept à la réalisation pratique. Le dispositif doit intégrer la stabilisation en température du cristal, la possibilité de moduler la puissance du laser et le contrôle de la polarisation des photons sortants. Il est possible de voir sur la photo du bas une tentative d'utiliser une diode laser (Aérodiod) compacte qui n'a pas été gardée pour l'expérience dû à un manque de stabilité et de cohérence.

En termes d'intrication énergie-temps, il est difficile de faire plus simple, plus robuste et plus efficace que la source précédente. Les objectifs pour la seconde source visaient donc l'exploration d'une observable différente : la polarisation. En pratique, il s'agit d'une source d'intrication en polarisation et en énergie-temps. Elle exploite une configuration de type interféromètre de Sagnac non-linéaire telle que présenté dans les travaux [9,13] et combine des connaissances des travaux [17] pour proposer un système compact et 100% télécom qui génère l'état quantique :

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|HH\rangle + |VV\rangle)$$

Nous retrouvons donc dans la boucle de Sagnac une paire de cristaux non-linéaires pour un processus de génération de paires de photons via un processus SHG et SPDC en cascade comme présenté sur la Figure 2.20. Les résultats détaillés sont disponibles dans la thèse de Tess Troisi mais il est intéressant de noter ici que, à contrario de la source précédente, la partie centrale du spectre à 1560,6 nm n'est pas disponible car polluée par le bruit résiduel du laser de pompe¹³.

La source dispose de tous les systèmes de contrôle à distance de la température du cristal, de la puissance du laser mais surtout de la polarisation du laser de pompe qui assure l'équilibre entre les contributions $|HH\rangle$ et $|VV\rangle$. Nous avons obtenu des performances en termes de brillance tout à fait adéquates pour un déploiement hors du laboratoire. Le rapport signal à bruit (CAR) présenté sur la Figure 2.19 est excellent pour des taux de coïncidences supérieurs au MHz. La fidélité à l'état ϕ^+ en polarisation a été mesurée via une tomographie de l'état quantique et s'avère supérieure à 99%.

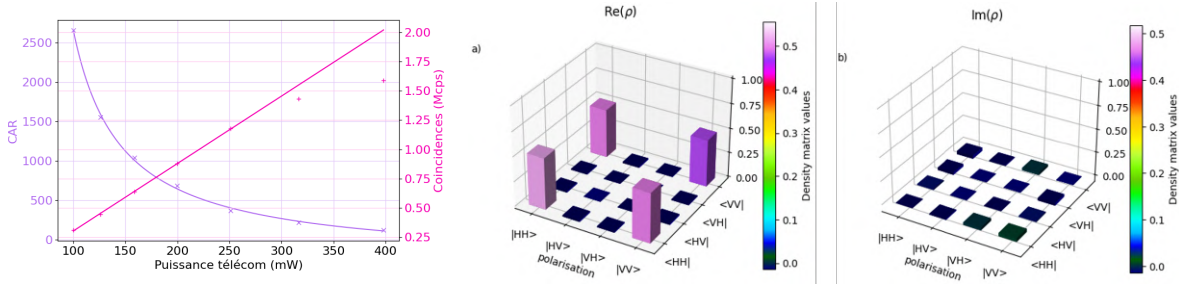


Figure 2.19 – Mesure des performances quantiques de la source Sagnac 100% télécom. Étude de la brillance et du rapport signal à bruit en fonction de la puissance de pompe. La fidélité de l'état quantique à l'état $|\phi^+\rangle$ a été mesurée via une expérience de tomographie et a montré une valeur de 99,5%.

13. Anecdotes : il faut pas moins de 6 DWDM en cascade pour atteindre les 120 dB d'isolation requis entre le laser de pompe à 1560,- nm et les paires de photons autour de 1560 nm. Par ailleurs, une gestion « millimétrique » des longueurs de fibre est nécessaire pour réduire au maximum le bruit optique dû au processus Raman des photons de pompe.

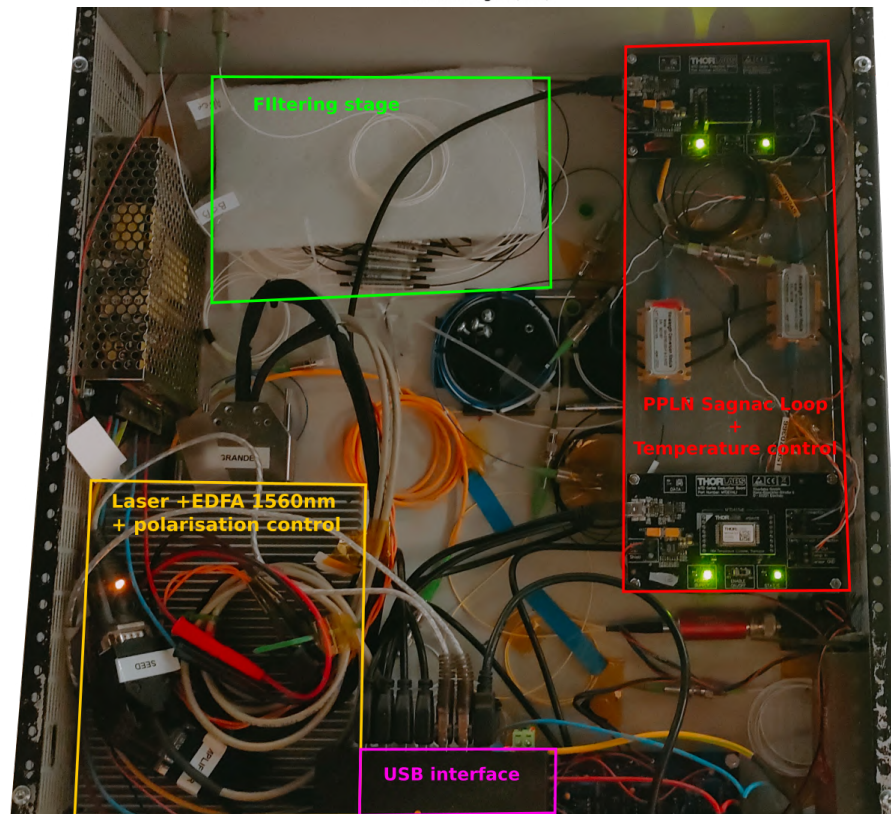
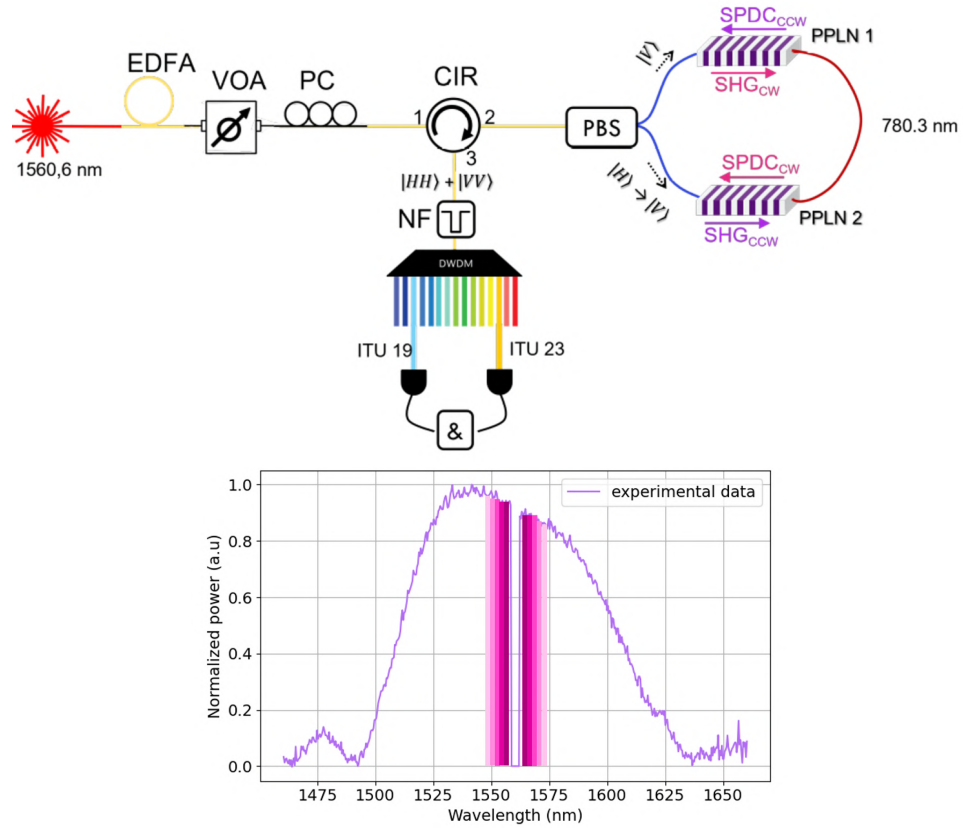


Figure 2.20 – Source d'intrication en polarisation. Du concept à la réalisation pratique. Le dispositif doit intégrer la stabilisation en température du cristal, la possibilité de moduler la puissance et contrôler la polarisation du laser de pompe.

En 2021, quand notre travail sur la spatialisation de source d'intrication a démarré, une vraie question s'est posée : « *Quelle est la longueur d'onde la mieux adaptée à un lien de communication optique via un télescope ?* ». Historiquement la fenêtre du visible (~ 800 nm) était bien implantée mais l'essor des télécommunications optiques vers les satellites laissait présager que l'infrarouge (~ 1550 nm) serait une option viable. Nous avons donc élaboré un troisième type de source pour réaliser des tests avec notre partenaire à GEOAZUR qui émet des paires de photons aux longueurs d'onde de 810 nm et 1550 nm (voir Figure 2.22). Ce travail s'inspire également des références [9,13] pour la configuration Sagnac et des références [20,40] pour le choix des longueurs d'onde. Des choix importants sur la configuration en optique massive de la source ont été motivés par le travail de A. Martin dans la référence [140] qui permet de compenser la faible brillance et la faible compacité par un couplage optimal des paires de photons dans des fibres optiques monomodes. Un papier est en cours de soumission sur cette source dont les performances en termes de qualité d'intrication dépassent les 99,5% en polarisation et en énergie-temps comme présenté sur la Figure 2.21 qui présente les performances en termes d'intrication mais également de brillance.

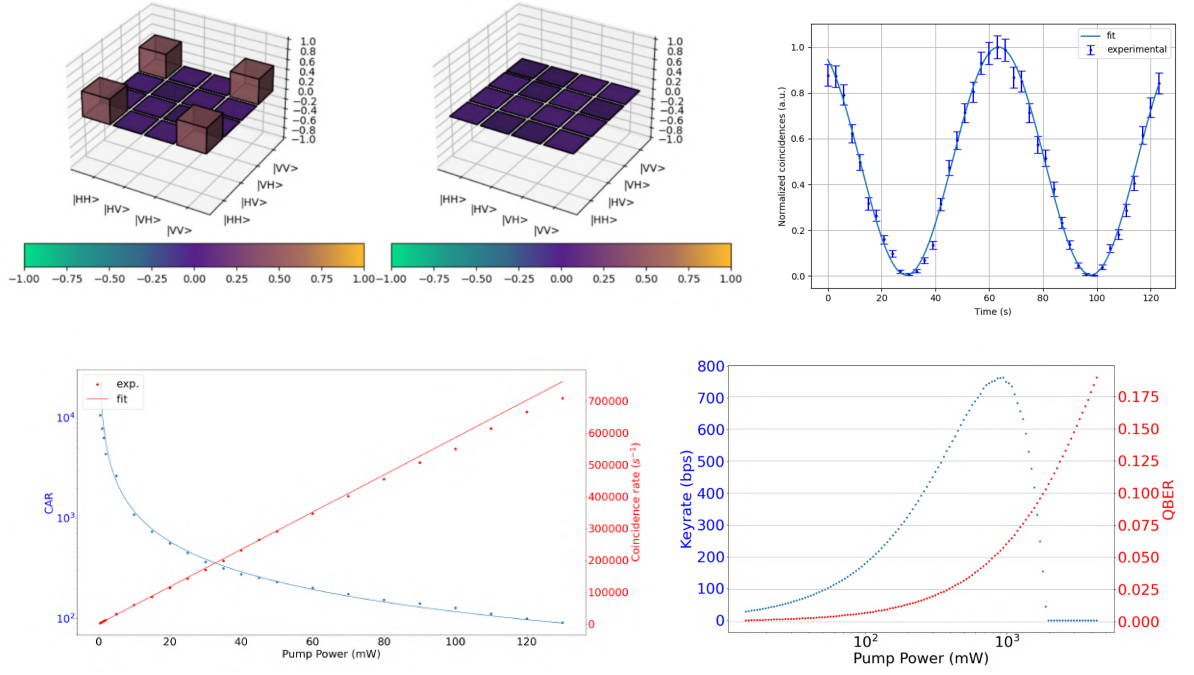


Figure 2.21 – Performances obtenues pour une source d'intrication bi-couleur en optique massive. Les qualités d'intrication dépassent les 99,5% sur les deux observables (énergie-temps et polarisation). Le rapport signal à bruit (CAR) est également de très haut niveau pour des taux de coïncidences de plusieurs centaines de kHz. La brillance est d'ailleurs en deçà des sources précédentes puisqu'il faudrait 1 W de pompe pour se placer dans le régime optimal ($\sim 0,05$ paires par fenêtre d'analyse pour un lien de 50 km). Toujours est-il que la centaine de mW (disponibles avec le laser) suffisent pour des études comparatives de liens en optique libre selon deux fenêtres spectrales.

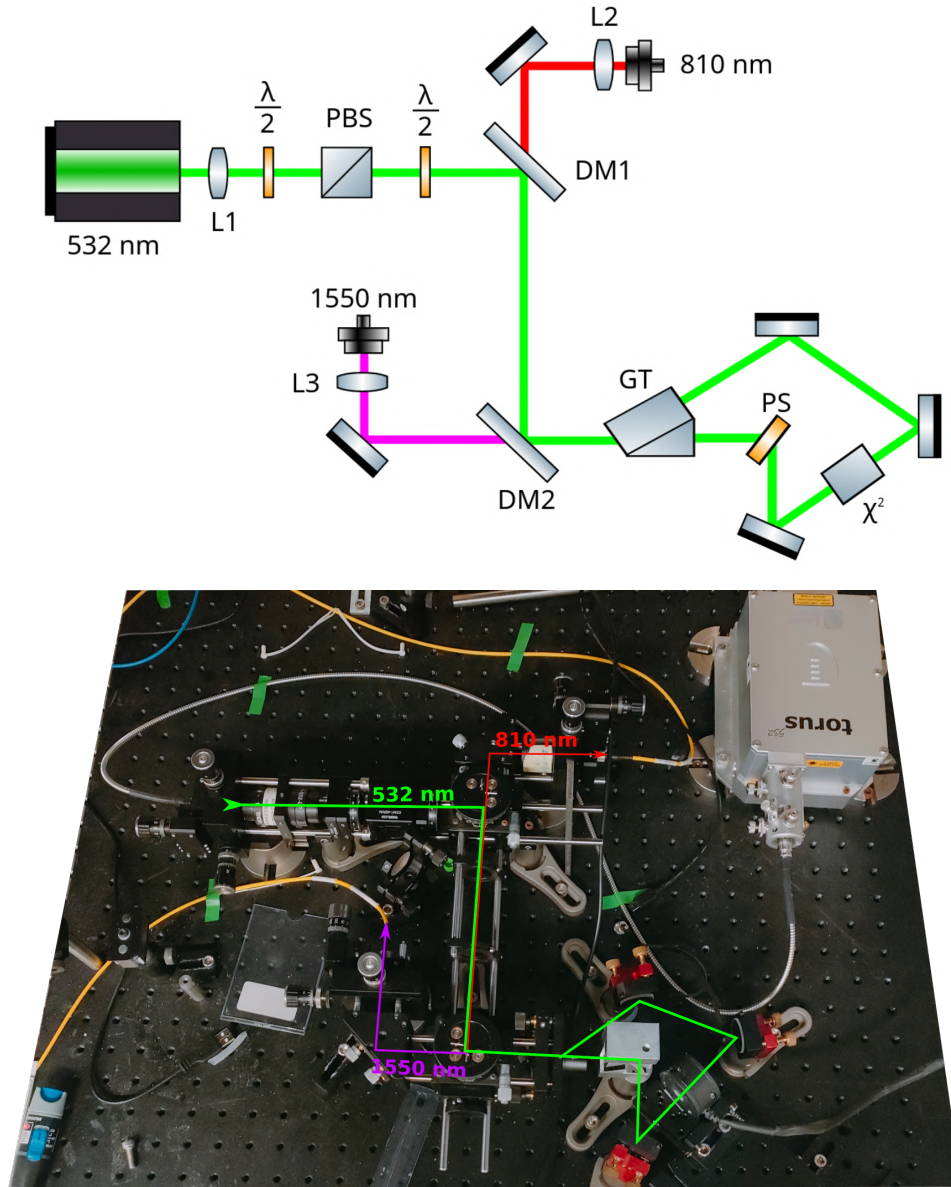


Figure 2.22 – Source d'intrication en polarisation bi-couleur. Du concept à la réalisation pratique. Ici le dispositif n'intègre pas le contrôle à distance de la stabilisation en température du cristal ni la possibilité de moduler la puissance du laser. Cette source a pour objectif de servir de test pour valider des architectures de liens spatiaux.

Sources de photons uniques

Les sources de photons uniques sont une ressource essentielle pour diverses tâches de communication quantique. Une véritable source de photons uniques trouve sa place dans des protocoles élémentaires de QKD tels que BB84 aux tâches plus générales telles que la téléportation quantique. Nous avons vu que les aspects compacité, fiabilité et couplage à des fibres sont des accélérateurs pour des réalisations en champ réel. Si les sources de paires de photons à base de niobate de lithium sont des candidats de premier choix en raison de leur maturité industrielle et de leur compatibilité avec un fonctionnement à température ambiante, il n'existe pas de situation équivalente pour les sources de photons uniques. C'est justement sur cet aspect qu'elles ont rapidement été supplantées par des lasers atténués¹⁴ pour des applications déployées de type QKD. La plupart des solutions commerciales exploitent le protocole BB84 avec des « états leurres » (decoy-states) et dominent l'espace hors des laboratoires (relire la section 1.3.2).

Pourtant, il me semble important de fournir des efforts technologiques pour innover dans ce domaine et réaliser des sources de photons uniques adaptées au fonctionnement en champ réel. Il faut avoir à l'esprit que les progrès des techniques de croissance des semi-conducteurs au cours des trente dernières années ont en effet permis la fabrication de boîtes quantiques couplées à des microcavités, présentant des efficacités et des performances inégalées [141]. Ces dispositifs ont permis des progrès rapides dans le domaine de l'informatique quantique photonique mais, malgré les efforts considérables déployés pour proposer des dispositifs couplés à une fibre [142], un obstacle subsiste à l'adoption généralisée de telles sources de photons uniques : la nécessité de les faire fonctionner à des températures cryogéniques. Il existe bien quelques dispositifs à température ambiante mais les longueurs d'onde d'émission ne sont pas adaptées aux réseaux de fibres et leur potentiel d'intégration dans des circuits optiques couplés à des fibres n'est pas trivial [143, 144, 145, 146].

C'est dans ce cadre que je collabore avec J. Zúñiga-Pérez du CRHEA à Sophia-Antipolis sur l'utilisation du Nitrure de Gallium (un semiconducteur utilisé pour les LED UV-visible) pour démontrer la génération de photons uniques aux longueurs d'onde des télécommunications. Le potentiel du projet réside dans la capacité de certains défauts dans la maille cristalline du GaN à émettre des photons uniques dans l'infra-rouge à température ambiante et du très grand savoir-faire du CRHEA pour fabriquer des structures photoniques afin de récolter ces photons dans une fibre optique ou d'assurer un pompage électrique des dispositifs. Le GaN est le deuxième semi-conducteur le plus utilisé dans le monde en termes de parts de marché, derrière le silicium, et les chercheurs peuvent tirer pleinement parti du savoir-faire technologique développé jusqu'à présent pour le développement de LEDs et l'électronique haute puissance¹⁵. Ce travail fait l'objet d'un financement de l'ANR et Nathan Lecaron conduit actuellement ses travaux de thèse sur

14. Avec randomisation de la phase pour obtenir un mélange statistique d'états de Fock plutôt qu'un véritable état cohérent.

15. Par exemple : injection électrique, réflecteurs de Bragg distribués Air/GaN, guides d'ondes optiques, coupleurs, cristaux photoniques. . .

grande probabilité d'émission et de collecte de photons uniques), fonctionnant à fort taux de répétition et dont la longueur d'onde d'émission serait dans la bande -O ou -C des télécom de $1,3\,\mu\text{m}$ ou $1,5\,\mu\text{m}$. Dans un premier temps, l'indiscernabilité n'est pas une priorité, puisque que le développement d'un dispositif maximisant simultanément la luminosité, la pureté et la praticité est beaucoup plus pertinent.

Pour l'instant, nous avons atteint des performances équivalentes entre le montage en optique massive et le montage fibré. Nous avons également identifié des émetteurs dont les performances optiques suivent les objectifs que nous nous sommes fixés (voir Figure 2.25). La source présente une brillance proche de 100 kHz de photons uniques dont la longueur d'onde est centrée à 1292 nm et le degré de pureté $g^{(2)}(0)$ atteint $5 \cdot 10^{-2}$. Il est intéressant de souligner que le standard des télécoms définit des fenêtres spectrales de 13 nm pour les communications dans la bande-O et que nous avons trouvé quelques émetteurs qui rentrent parfaitement dans cette fenêtre. Pour reprendre un des résultats de la thèse de Max Meunier du CRHEA [147] sur la Figure 2.24, cela reste encore une chasse au trésor et il devient important de comprendre le processus physique à l'origine de ces émetteurs.

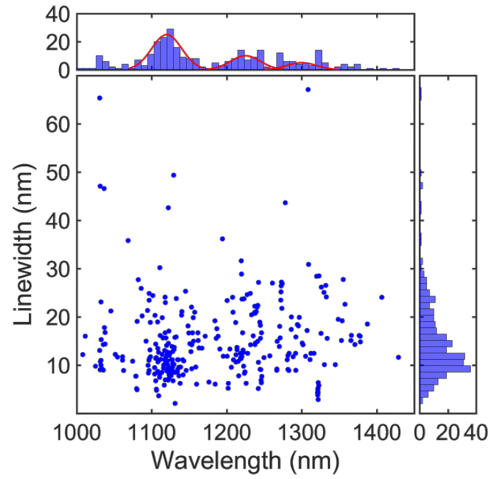


Figure 2.24 – Statistique de la longueur d'onde centrale (nm) et de la largeur spectrale (nm) de plus de 150 émetteurs identifiés au CRHEA par M. Meunier durant sa thèse [147].

L'étape suivante est d'étudier la réponse des émetteurs au pompage impulsionnel à haute fréquence ($\geq 1\,\text{GHz}$) et d'une façon plus fondamentale, d'étudier les caractéristiques des émetteurs afin de pouvoir les intégrer à des structures photoniques comme des guides d'onde ou des micro-cavités pour optimiser la collection des photons et obtenir un dispositif capable de concurrencer les lasers atténués pour les applications QKD. L'enjeu est clairement ambitieux compte tenu de la jeunesse de cette activité, mais nous disposons d'un soutien financier de l'ANR jusqu'en 2027.

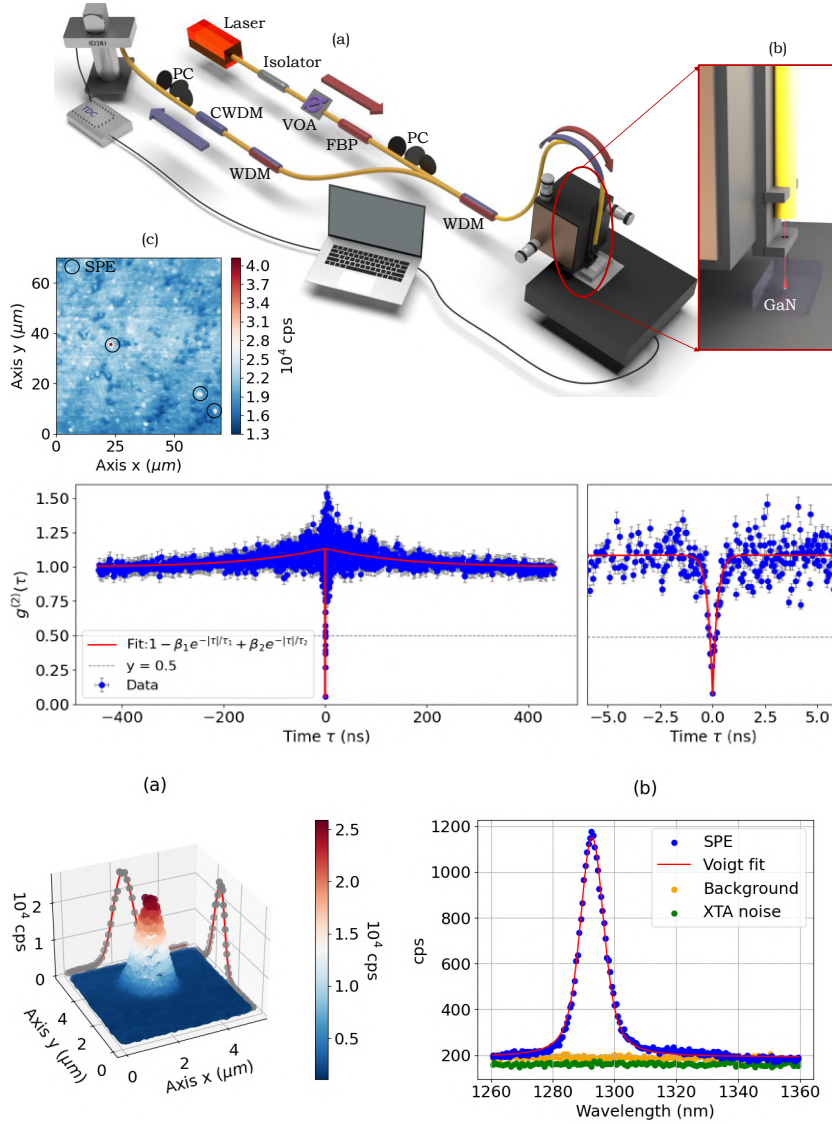


Figure 2.25 – Performances générales d’une source de photons uniques à température ambiante dans le GaN intégralement fibrée. Les émetteurs ont une répartition spatiale de quelques microns avec un niveau de bruit issu de la maille cristalline de GaN négligeable. L’analyse spectrale des photons a confirmé un niveau de bruit négligeable et dans le cas de l’émetteur identifié ici, un spectre centré à 1290 nm associé à une largeur spectrale de 10 nm. Le montage exploite une fibre micro-lentillée pour assurer la collection de photons. Les performances quantiques obtenues sont encourageantes avec des brillances jusqu’à 100 kHz et des puretés $g^{(2)}(0)$ de l’ordre de $5 \cdot 10^{-2}$.

Défis #2 & 3 : Distribution quantique de clés au sol

[2] **Operational entanglement-based quantum key distribution over 50 km of real-field optical fibres** Y. Pelet, G. Sauder, M. Cohen, L. Labonte, O. Alibart, A. Martin and S. Tanzilli, Phys. Rev. Applied **20**, 044006 (2023)

[à paraître] **Entanglement-based clock syntonization for quantum key distribution networks. Demonstration over a 50 km-long link** Y. Pelet, G. Sauder, S. Tanzilli, O. Alibart and A. Martin, arXiv :2501.16796 [quant-ph] (2025)

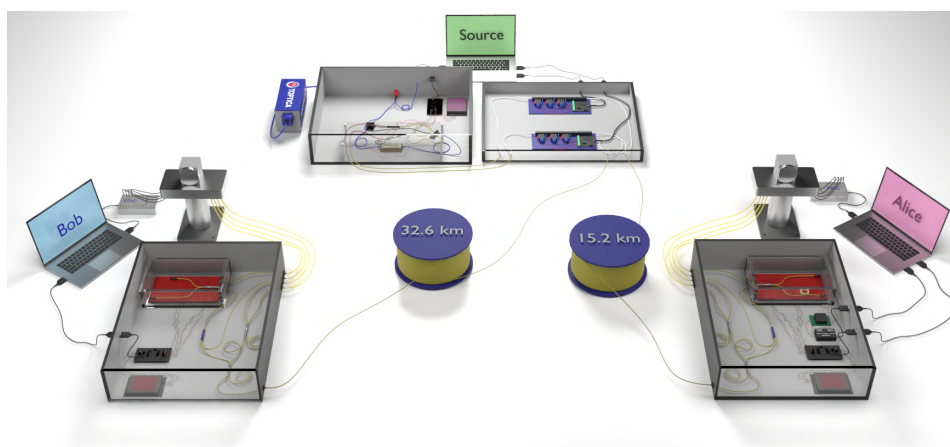


Figure 2.26 – Synoptique de l’expérience de QKD qui a été déployée sur le réseau Q@UniCA.

Ce qui saute aux yeux, c’est que première contrainte rencontrée est le standard d’intégration des équipements électroniques qui impose l’utilisation de boîtes de dimension 425 x 245 mm, et de composants à fibre optique pour la miniaturisation. 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 (puissance du laser, polarisation de sortie, phase des interféromètres, température...) doivent donc être pilotables à distance via un ordinateur connecté à internet

Au-delà de développer des dispositifs capables de fonctionner dans des environnements « hostiles », par exemple dans des salles serveurs où les perturbations électromagnétiques et les variations de température sont gigantesques comparativement à un laboratoire, les défis que nous sommes en train de relever concernent la synchronisation des horloges de chaque nœud, la stabilisation relative en phase d’interféromètres distants mais aussi la stabilisation de la polarisation des photons lors de leur propagation dans les fibres. Tous ces challenges sont adressés grâce à notre savoir-faire en interférométrie quantique mais également grâce à des collaborations que j’entretiens avec l’équipe GÉODIM¹⁶ du laboratoire GEOAZUR spécialisé en métrologie temporelle et fréquentielle. Je suis impliqué dans le pilotage de ce projet depuis son origine en 2019 et en particulier sur le

16. Géodésie Spatiale, Instrumentation et Méthodes

déploiement du réseau de fibre, le développement des sources d'intrication et sur les choix stratégiques qui ont conduit à la première démonstration à l'été 2021 de distribution d'intrication sur un réseau métropolitain français [2]. Je pilote l'extension du réseau jusqu'au site de l'observatoire astronomique de Calern (financement via projet européen FranceQCI dont je suis le pilote local) et j'assume la coordination des divers projets sur ce réseau. Cela vise aussi bien le partage d'intrication sur 100 km que l'étude de liens hybrides c'est-à-dire mêlant des liens en espace libre et des liens fibrés. Il s'agit de liens qui préfigurent des futurs réseaux de communication grande distance via les satellites. La fonctionnalisation du réseau et son évolution sont aussi financées par le PEPR QCOMTESTBED dont je suis le co-coordonateur avec Eleni Diamanti.

En termes de réalisation, nous avons montré en 2023 [2], la distribution de clefs secrètes sur 50 km à un débit de 7 kbits/s. Ce qui est notable dans l'expérience, ce n'est pas tant la distance ou le débit car il n'existait aucune réalisation démonstration de QKD à base d'intrication sur de telles distances¹⁷, mais c'est surtout le traitement complet (correction d'erreurs et amplification de sécurité) des clefs en temps réel et l'automatisation totale du programme qui assurent le fonctionnement en autonomie du dispositif pendant plus de 300 h (voir Figure 2.28) sans intervention humaine. Par ailleurs, les techniques mises en place pour assurer la synchronisation des horloges et la stabilisation des interféromètres sont remarquables puisqu'elles ne font pas appel à des signaux classiques, contrairement à la plupart des expériences présentées dans la section 1.3.2.

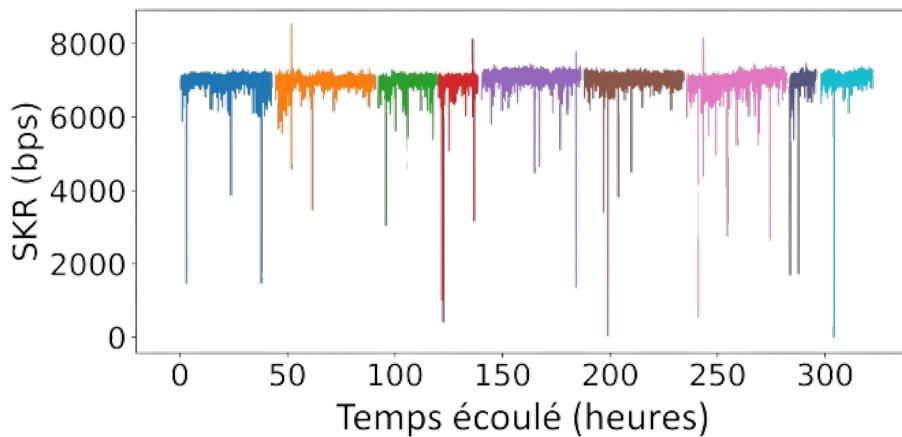


Figure 2.27 – Taux de clefs secrètes (SKR) partagées pendant plus de 300 h entre Alice et Bob. Chaque couleur représente un redémarrage automatique du programme après un cycle d'évaporation des détecteurs refroidis à l'hélium liquide (ou un crash du programme). Les chutes brutales et temporaires du taux de clefs correspondent quant à elles à des pertes de la synchronisation et/ou de la stabilisation relative des deux interféromètres.

17. Il y a toutefois eu la référence [79] qui a été publiée très très peu de temps avant. Voir la Figure 1.16.

Il faut aussi noter que l'on retrouve des techniques issues des travaux de l'équipe [139] pour la démonstration de QKD sur une vingtaine de canaux DWDM, par exemple sur la Figure 2.28 qui sera publiée très bientôt. Nous avons en effet montré qu'il était possible de connecter jusqu'à 40 utilisateurs, couvrant ainsi toutes les installations clefs d'une petite ville.

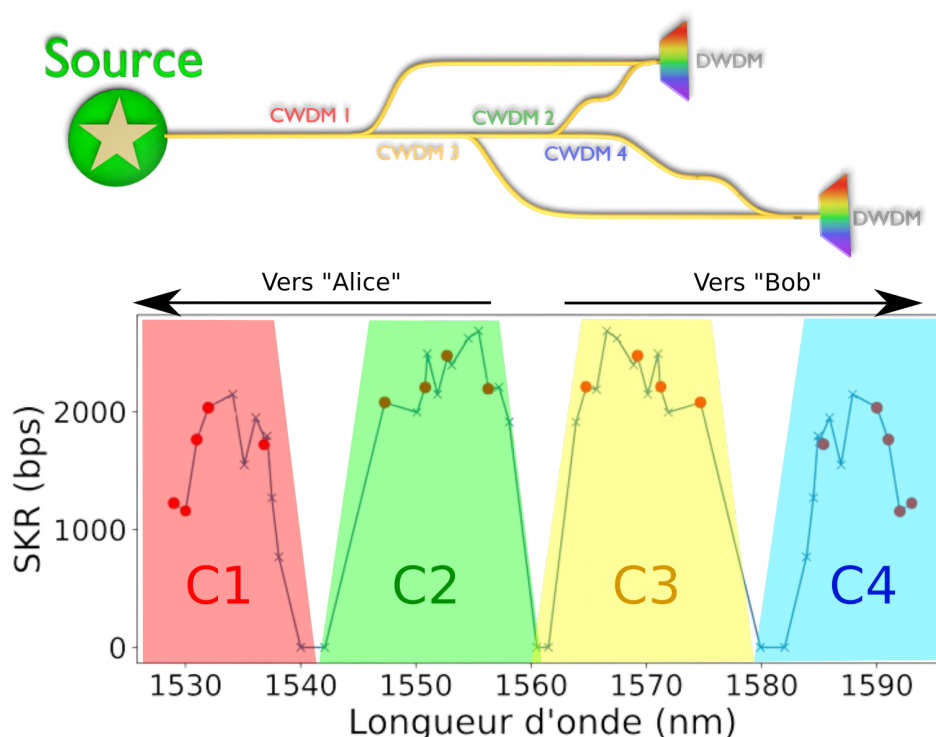


Figure 2.28 – Taux de clefs secrètes (SKR) mesuré sur le lien de QKD en fonction de la longueur d'onde des canaux utilisés. Les points rouges sont des résultats mesurés avec le réseau déployé sur 48 km et les croix bleues sont mesurées localement, avec tous les modules regroupés dans un même laboratoire, avec toutefois des pertes de transmission similaires à celles du réseau déployé induites par un atténuateur variable. Les canaux C1, C2, C3 et C4 correspondent aux transmissions des filtres CWDM utilisés pour le demultiplexage/routage en longueur d'onde.

Défis #2 & 3 & 4 : Distribution quantique de clefs vers l'espace

[3] Satellite-based quantum information networks : use cases, architecture, and roadmap, L. de Forges de Parny, **O. Alibart**, J. Debaud, S. Gressani, A. Lagarrigue, A. Martin, A. Metrat, M. Schiavon, T. Troisi, E. Diamanti, P. Gélard, E. Kerstel, S. Tanzilli and M. Van Den Bossche, *Commun Phys* **6**, 12 (2022)

La portée d'échange quantique de clefs de cryptographie est augmentable à l'aide de répéteurs quantiques basés sur des mémoires quantiques. Malgré les progrès fulgurants dans ce domaine (en termes de durée de stockage et de bande-passante), l'usage de liens de communication au travers de l'espace reste une alternative de choix permettant d'atteindre de plus longues distances d'échange sans utiliser ces répéteurs. En effet, la limitation principale devient alors essentiellement le champ de vision du satellite.

Dans ce contexte, je mène également, en collaboration avec THALES, ORANGE et le laboratoire GEOAZUR, des études qui visent à identifier :

- des solutions pour limiter les effets de la turbulence atmosphérique sur le couplage des photons en espace libre vers une fibre monomode en adaptant des techniques issues de l'astronomie.
- la topologie idéale d'un réseau quantique mêlant des liens satellitaires mais également terrestres.
- des solutions de stabilisation des analyseurs et de synchronisation des horloges dans des régimes où les pertes sont extrêmes et surtout la position relative des différents acteurs change à la vitesse de plusieurs km/s.
- d'une façon globale les performances attendues d'un lien de QKD spatiale.

Encore une fois, la structure du réseau telle que nous l'avons imaginée (une station optique sol connectée à un réseau de fibre métropolitain) devient un formidable terrain de jeu unique en Europe. Toutes les questions ouvertes sur la gestion des turbulences, mais aussi des stabilisations/synchronisations dans les cas de pertes extrêmes sur le canal optique sont adressables ici. À titre de comparaison, la référence [2] exploitait directement les corrélations quantiques pour assurer la synchronisation et la stabilisation des analyseurs quantiques. Ce choix impose des contraintes fortes sur les pertes puisqu'il faut en effet disposer de suffisamment d'échantillons de détection 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. Nous avons établi à 35 dB, soit environ 100 km de fibre, les pertes maximales tandis que pour un lien 100% satellitaire basse orbite (les deux photons voyagent depuis le satellite vers la terre) elles sont estimées à 80 dB . Il faudra donc innover pour le cas spatial !

Défi #5 : Utilisation des clefs – Cryptographie

[à paraître] **An ETSI GS QKD compliant TLS implementation**, T. Prévost, B. Martin and **O. Alibert**, Cryptology ePrint Archive, Paper 2025/389 (2025)

[à paraître] **MUTLISS : a protocol for long-term secure distributed storage over multiple remote QKD networks**, T. Prévost, **O. Alibert**, A. Marin and M. Kaplan, Cryptology ePrint Archive, Paper 2024/1915 (2024)

La distribution quantique de clefs secrètes ne sert à rien si les protocoles de chiffrement des données ne sont pas adaptés. Aujourd’hui, les principaux algorithmes utilisés par les applications leaders (firefox, Zoom, whatsapp,...) exploitent tous une librairie standard implémentant le protocole TLS (**OpenSSL** ou **LibreSSL** par exemple) pour assurer le transport de la clef et la confidentialité de la communication. En collaboration avec Bruno Martin de l’I3S, nous travaillons sur la définition et l’intégration d’un protocole quantique de distribution de clefs à ajouter aux mécanismes standards de transport de clefs basé sur la cryptographie asymétrique (AES). Les enjeux de ce travail sont doubles :

- Il concerne l’établissement d’un protocole opératoire respectant les règles définies par l’Institut Européen des Normes de Télécommunications (ETSI) qui produit des normes pour l’industrie des technologies de l’information et de la communication.
- Le protocole doit pouvoir s’adapter dynamiquement en fonction de la disponibilité (ou non) de clefs secrètes établies par QKD. Prenons l’exemple d’une communication Paris-Nice s’appuyant sur une vingtaine de petits liens d’environ 50 km parmi lesquels seuls la moitié disposent de clefs secrètes établies selon les lois de la physique quantique. Le protocole doit donc composer avec des clefs « classiques » (ou post-quantiques) et « quantiques », et assurer un transport efficace d’une clef de Nice à Paris.

La collaboration avec I3S via le co-encadrement de la thèse de Thomas Prévost avec Bruno Martin a permis un usage multi-utilisateur du dispositif expérimental de Quantum@UniCA au moyen d’une implémentation de la proposition de standard de l’ETSI dont la validité a été prouvée par l’outil de vérification de protocoles de sécurité ProVerif [148]. Un cas d’usage de ce travail porte sur la réalisation logicielle d’un dispositif de visio-conférence sécurisé par le dispositif de distribution quantique de clefs. Ce logiciel a été utilisé lors de l’inauguration du nouveau bâtiment du laboratoire Inphyni et a eu les honneurs de la presse¹⁸.

Plus récemment, une collaboration avec la société VeriQloud a été initiée et a donné lieu à un protocole de stockage sur cloud confidentiel [149] et, à moyen terme, nous envisageons de réaliser une démonstration conjointe sur les réseaux Q@UniCA et ParisQCI qui combinent à la fois des techniques de physique quantique et d’informatique.

A plus long terme, nous pensons contribuer à la détection d’anomalies (aléa contenu dans les clefs non maximal) lors de la distribution quantique des clés mais aussi proposer

18. <https://newsroom.univ-cotedazur.fr/actualites-evenements/inauguration-de-linstitut-de-physique-de-nice>

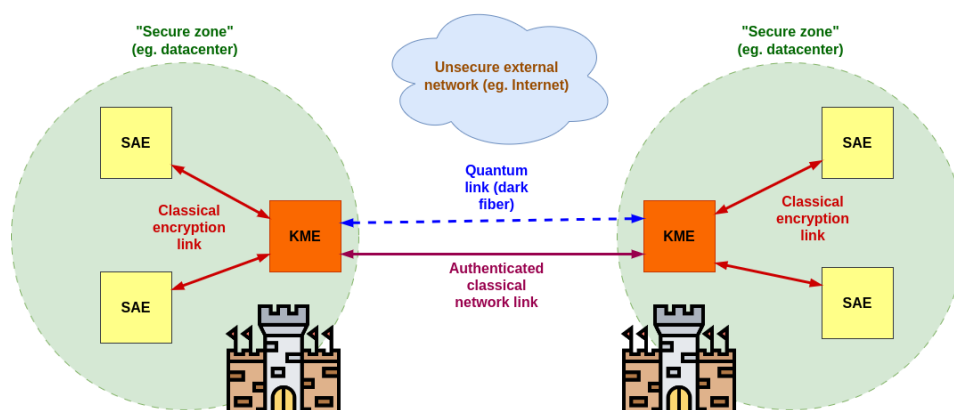


Figure 2.29 – Définition du protocole de chiffrement selon la norme ETSI. Les diverses applications (**S**ystem **A**plication **E**ntity) au sein d'un « bastion » (zone sûre) font appel à des clefs secrètes stockées sur des serveurs (**K**ey **M**anagement **E**ntity). La physique quantique opère sur le lien en pointillé bleu mais pour une utilisation à des fin de chiffrement, l'ETSI définit la procédure d'appel des clefs, leur utilisation et leur destruction. Ce travail s'inscrit dans les activités de cyber-sécurité qui sont la spécialité de l'I3S et les activités sont menées par un doctorant (T. Prévost) que je co-encadre avec B. Martin.

des alternatives à l'algorithme de privacy amplification qui est appliqué à l'issue de la construction des clefs partagées et qui consomme beaucoup de données.

Et après ?

Pour finir cette partie, je pilote une série de travaux dont les extensions nous projettent jusqu'en 2030.

- À très court terme, nous prévoyons la démonstration de distribution quantique de clefs sur 100 km d'ici l'été 2025.
- La démonstration d'un lien de QKD à base de polarisation à haut débit. Ce travail a été entamé par la thèse de T. Troisi mais il reste un effort à faire sur les analyseurs et la stabilisation de polarisation pour atteindre des performances remarquables.
- À moyen terme, nous préparons notre rendez vous avec le satellite européen « Eagle-1 » dédié à la QKD dont le lancement est prévue fin 2026. D'autres missions sont également en cours de préparation telles que SAGA de l'agence spatiale européenne ou QINSAT de la société Thalès à l'horizon 2030. C'est typiquement la situation qui requiert l'utilisation de la source bi-couleur présentée à la section 2.3.2.
- Avant d'échanger avec les satellites, des tests préliminaires doivent être opérés dès maintenant depuis des cibles fixes sur le plateau de Calern en direction du télescope MéO pour dimensionner correctement les systèmes de stabilisation, de correction de la turbulence et de synchronisation dans des conditions extrêmes.
- Un des aspects intéressant du réseau Q@UniCA est qu'il lie une station sol à un réseau métropolitain. L'étude d'une source d'intrication capable d'interfacer ces deux types de réseaux est à l'étude avec la source bi-couleur présentée à la section 2.3.2.
- Une expérience de téléportation en exploitant notre brevet de synchronisation est clairement une de mes priorités car elle permettrait d'envisager de plus longues distances si le réseau venait à s'étendre vers L'Italie ou en direction de Marseille.
- Nous disposons au laboratoire d'une activité « mémoire quantique » sous la direction de J. Etesse. Il est tout à fait envisageable de considérer des démonstrations de stockage et/ou de répéteur quantique sur le réseau à l'échelle de 2030 en nous appuyant sur des interfaces de conversion de longueur d'onde développées au laboratoire [18,21].
- A plus long terme, en collaboration avec B. Martin de l'I3S, nous pensons contribuer à la détection d'anomalies lors de la distribution quantique des clefs.
- Nous sommes entrain de vivre l'éclosion du niobate de lithium en couche mince. Historiquement fortement impliqué avec la plateforme OPTINIL de F. Doutré à l'INPHYNI, j'entretiens une collaboration active pour la fabrication de circuits optiques non triviaux au-delà de l'état de l'art des produits commerciaux. L'étude des couches minces (de quelques centaines de nm) de niobate de lithium sur isolant (LNOI) est au cœur de nos discussions. En effet, en poussant à l'extrême le confinement de la lumière, les couches minces permettent une réduction des longueurs d'interactions et ouvrent des perspectives vastes en photonique quantique en termes de brillance et de vitesse de modulation.

Chapitre 3

Activités pédagogiques

3.1 Activités pédagogiques

Depuis mon recrutement en 2006, j'ai eu l'opportunité d'enseigner à peu près à tous les niveaux. J'ai commencé essentiellement en TP/TD en L1, L2 et L3 avec quelques cours magistraux liés à ma spécialité (optique quantique) dans des parcours en création comme le parcours » Philo-physique » de l'université de Nice Sophia Antipolis.

J'ai choisi de renouveler mes enseignements régulièrement pour ne pas rentrer dans un ennui routinier. J'ai donc fait évoluer cette base d'enseignement en cédant certains enseignements pour en démarrer des nouveaux. Sans faire la liste exhaustive, j'ai couvert des TP, TD et cours magistraux en L1, L2, L3, M1 et M2 et les cours que je dispense cette année n'ont plus rien en commun avec ceux que j'ai pu faire les première années de mon recrutement¹. À titre d'exemple, je présente dans le tableau ci dessous cinq exemples de fiches de service qui couvrent mes vingt années au sein de l'université.

2006-2007	2012-2013	2016-2017
TP Électromag. L2	TP Meth. Exp. L3	TD Mécanique L1
TD Électromag. L3	TD Électromag. L3	TD Ondes L1
TD Relativité L2	TD Phys. quantique L3	TD Phys. quantique L3
TD Thermodynamique L1	TD Phys. Atomique M1	TD Méthodologie L1
Cours Info. Quantique L1	Cours Opt. Quant. M2	TP Syst. Dynamiques L3
Cours Opt. Quant. L3 philo-phys	Cours Électricité L1	Cours Opt. quantique M2

20020-2021	2024-2025
TP Mécanique L1	Cours Phys. quantique M1
TD Électromag. & relativité L3	TD/TP Phys. quantique L3
TD/TP Phys. quantique L3	Mineur Techno. quantique
TD physique quantique M1	décharge 60 h
Cours Opt. quantique M2	TP optique L1

1. À l'exception des L3 de physique qui me subissent en chargé de TD de physique quantique depuis 2012.

Parmi les enseignements novateurs qu'il m'a été donné d'encadrer, je peux citer :

- Les cours d'optique quantique et d'optique ondulatoire dans une formation transversale comme le parcours de Licence Philo-Physique en partenariat avec l'UFR de Lettres de Nice. (Parcours fermé depuis)
- Les cours/TD à deux voix avec un informaticien réseau sur le WIFI et ses concepts physiques en L3 pro réseau et télécoms de l'IUT de Nice (<http://lppt.unice.fr/>)
- L'introduction à l'information quantique en L1 informatique de l'université de Nice (cours arrêté depuis)
- un TD de pédagogie innovante (sous la direction de F. Blanc) sur l'apprentissage de la physique par résolution de problèmes.

J'aimerais dire deux mots sur ce dernier enseignement qui est particulièrement intéressant, je trouve. L'idée est de confronter les étudiants à des questions très ouvertes et de leur imposer² l'unique règle de suivre un raisonnement scientifique pour y répondre au mieux. C'est une qualité importante pour un scientifique de pouvoir s'emparer d'un problème, de le traiter dans le cadre de ses connaissances avec une rigueur propre à la démarche scientifique.

J'ai reproduit sur la page suivante les deux sujets que j'avais imaginés. Comme ils s'adressent à des étudiants en licence 1, la mécanique du point est souvent au cœur des sujets mais nous abordons également de l'optique géométrique et de la thermodynamique.

2. leur enseigner en réalité

Sujet Examen 2017 : La reine des neiges

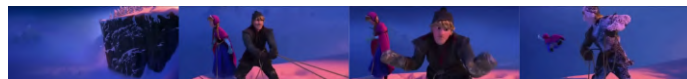
SUIET RECTO-VERSO

Contexte

Les héros fuient *guimauve* le redoutable monstre de glace.



Scénario



Images extraites du film "La reine des neiges de Disney : <https://www.youtube.com/watch?v=jw1J36JVMsY>

Christopher : Stop

Anna : Oh, non ! Il y a au moins 30 m de haut.

Christopher : ... 60 m ...

Anna : Qu'est ce que vous faites ?

Christopher : Je creuse un ancrage dans la neige.

Anna : D'accord, et si on tombe ?

Christopher : Il y a 6 m de poudreuse en bas, on aura l'impression de tomber sur un coussin... si tout va bien...

Christopher : Allez, Anna, à trois !

Anna : Je suis prête ! Moi quand je peux y aller, je suis prête... tout à fait prête !

Christopher : Calmez-vous

Anna (tout en sautant dans le vide) : TROIS !

Christopher : What the f...? (en version originale car intraduisible)

Question

Sauteriez-vous comme Anna ? Que vous dicte votre jugement de physicien ?

1

2

Sujet 4 : Record du monde de hauteur en BMX

VIDEO disponible sur : <http://www.youtube.com/watch?v=HSORjIheenY>



1 Le problème

La métropole cote d'Azur souhaiterait faire venir Matt Hoffman pour un événement d'envergure : *Battre son ancien record*. Compte tenu des enjeux publicitaires et économiques, il serait souhaitable que le record soit largement battu. Vous êtes le consultant scientifique pour le financement du projet : **Est-ce faisable ? Dans quelles conditions ? Pour quel record ?**

2 Quelques concepts de BMX

Une rampe de BMX se modélise par un quart de cercle, dont la sortie est verticale. En première approximation, il est acceptable de considérer que la hauteur atteinte par le rider est uniquement liée à sa vitesse d'entrée sur la rampe. Toutefois, il est alors important de calculer au plus juste le rayon de courbure de la rampe pour éviter que le rider subisse une trop forte accélération centripète lui faisant perdre le contrôle de son vélo. De l'avis des pratiquants, une accélération centripète de $a_c \approx 40 \text{ m.s}^{-2}$ est un maximum acceptable.

Annexe

La tolérance à l'accélération dépend directement du temps durant lequel un corps est soumis à cette accélération. Pour information, nous vous donnons le tableau de tolérance à l'accélération du corps humain d'après la NASA, exprimée en nombre de g (c.a.d multiple de $g=9,81 \text{ m.s}^{-1}$) en fonction du temps.

Temps	$+a_x$ (vers l'avant, sang vers le dos)	$-a_x$ (vers l'arrière, sang vers le ventre)	$+a_z$ (vers le haut, sang vers les pieds)	$-a_z$ (vers le bas, sang vers la tête)
0,6 s	35	28	18	8
1,8 s	28	22	14	7
6 s	20	17	11	5
18 s	15	12	9	4,5
1 min	11	9	7	3,3
3 min	9	8	6	2,5
10 min	6	5	4,5	2
30 min	4,5	4	3,5	1,8

Table 1: Données issues de [https://fr.wikipedia.org/wiki/G_\(accélération\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/G_(accélération))

3.2 Responsabilités pédagogiques

En 2018, avec plusieurs jeunes maîtres de conférences et le professeur F. Mortessagne, nous avons créé un master de physique générale qui faisait défaut au sein de l'université Côte d'Azur. Mon rôle a consisté à la mise en place, à choisir la ligne pédagogique et à la co-direction au quotidien du Master de physique de Nice « Onde, Atome & Matière » en collaboration avec F. Mortessagne, M. Albert, C. Cohen, C. Michel et C. Raufaste. Je suis en particulier responsable des relations internationales et j'ai contribué à la création d'une séquence d'enseignement bi-hebdomadaire intitulée « group meeting » durant laquelle les étudiants et chercheurs qui le désirent peuvent échanger librement autour de l'actualité scientifique. C'est un moment de débat et d'échange durant lequel nos « futurs chercheurs » apprennent l'art de communiquer, convaincre leur auditoire et défendre leur idées avec une rigueur scientifique.

Pour la rentrée 2025-2026, j'ai accepté le rôle de coordinateur du semestre 5 de la troisième année de licence de physique.

3.3 Diffusion scientifique

La diffusion scientifique est une facette de mon métier à laquelle j'attache beaucoup d'importance. J'estime qu'il est important de garder un lien fort avec le grand public pour plusieurs raisons. D'un côté, il est important que le travail de recherche ne soit pas placé sur un piédestal inaccessible qui renforce la vision du chercheur qui « fait une recherche » loin des préoccupations de la société civile. De l'autre, convaincre et faire comprendre les tenants et aboutissants de notre travail à des personnes qui n'ont pas forcément des connaissances scientifiques est un véritable challenge pédagogique qui nous fait progresser dans la compréhension des concepts que nous manipulons. Cela va bien au-delà du métier d'enseignant puisqu'il est impossible de se reposer sur un formalisme mathématique qui offre un support « confortable » pour convaincre les étudiants ou nos collègues. Quand l'occasion se présente, je ne manque jamais de relever le défi de communiquer sur les technologies quantiques auprès du grand public. Dans la suite, je présente quatre interventions qui se démarquent par leur format original.

3.3.1 Animation pédagogique sur les inégalités de Bell

Lors du projet « The Big Bell test » (voir section 2.3.1), j'ai été contacté par deux étudiants en design et arts graphiques de l'école de Condé à Nice qui cherchaient un stage professionnel de fin de troisième année, c'est-à-dire fournir une prestation de montage vidéo de niveau professionnel. Le challenge a été double. En premier lieu, il a fallu convaincre et expliquer les concepts physiques sous-jacents aux inégalités de Bell aux deux étudiants, qui bien que sensibles à la recherche en sciences, avaient des connais-

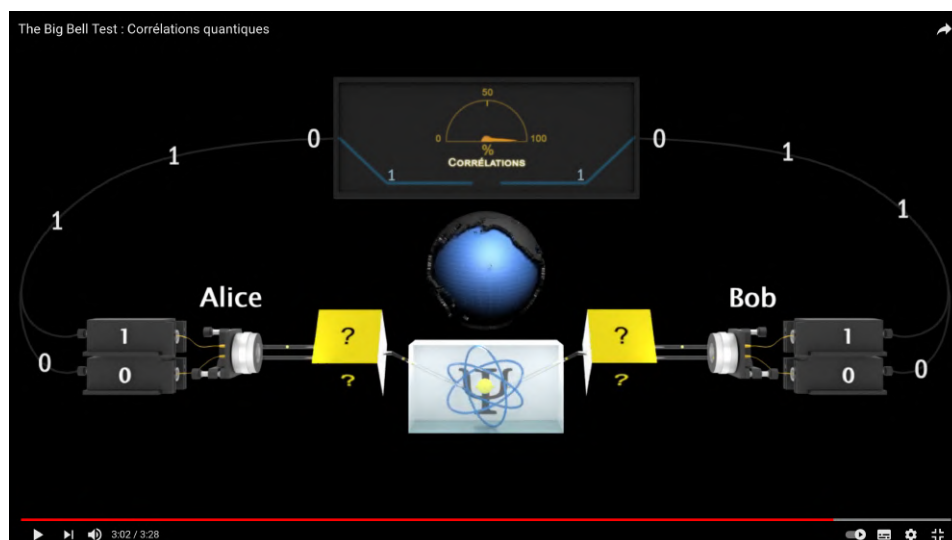


Figure 3.1 – The Big Bell Test : Qu’est ce que les corrélations quantiques : <https://www.youtube.com/watch?v=yN04Drocqu4>

sances de niveau terminal. Cette étape est primordiale pour qu’ils puissent faire le travail d’animation et de montage vidéo de façon efficace. Dans un second temps, il a fallu créer le « story board » de la vidéo en prenant en compte le public visé par la vidéo : le très grand public sans aucune connaissance en physique.

Nous avons donc réalisé une vidéo grand public pour expliquer les corrélations quantiques et l’importance du Big Bell test auquel mon équipe a participé. **The Big Bell test : Qu’est ce que les corrélations quantiques ?**. La vidéo est disponible sur la chaîne youtube de l’université Côte d’Azur : <https://www.youtube.com/watch?v=yN04Drocqu4> dont le screenshot est visible sur la Figure 3.1.

3.3.2 Le Décodeur Minute UCA

Au-delà des objectifs scientifiques du projet Quantum@UCA, un volet important de nos objectifs concerne la dissémination scientifique et la promotion de l’Université Côte d’Azur vis à vis du grand public. Dans ce cadre, nous communiquons sur l’aspect applicatif de la distribution quantique de clefs et la première vidéo de cette série à venir concerne la captation vidéo pour le service communication de l’Université Côte d’Azur d’un mini-tutoriel sur la cryptographie quantique. Le challenge ici est de faire passer les messages importants en moins de 3 minutes, de trouver les bonnes images pour toucher le public et faire comprendre les concepts physiques sous-jacents. La vidéo est disponible sur la chaîne youtube de l’université Côte d’Azur : <https://www.youtube.com/watch?v=EiRY7jfRoZ8>. Le screenshot est visible sur la Figure 3.2

Décodeur Minute - Communication quantique : vers une sécurisation totale



Figure 3.2 – Video UCA Le Décodeur Minute - Communication quantique : vers une sécurisation totale des données ? : <https://www.youtube.com/watch?v=EiRY7jfRoZ8>

des données ? <https://www.youtube.com/watch?v=EiRY7jfRoZ8>

3.3.3 Sciences pour tous

Membre de l'association « Sciences pour Tous » depuis sa création en 2019 jusqu'en 2024. Il s'agit d'une association loi 1901 composée de spécialistes ou chercheurs et enseignants-chercheurs de tous les organismes d'enseignement et de recherche des Alpes-Maritimes et de Monaco. Elle a pour objet d'organiser et de favoriser la diffusion de la culture scientifique dans les Alpes-Maritimes. L'ambition de Sciences pour Tous 06 est de participer à la transformation des Alpes-Maritimes en un vaste espace de médiation scientifique en organisant des cycles de conférences, sur toute l'année dans la plupart des lieux où elle intervient.


Toute la finesse de ce type d'intervention est d'utiliser des images volontaires accrocheuses pour capter l'attention d'un public néophyte, mais garder une rigueur propre à la démarche scientifique. Ce type d'intervention a lieu dans tout le département des Alpes-Maritimes avec deux interventions par an. sur la Figure 3.3 vous trouverez deux extraits de la présentation qui soulignent bien l'importance de ces interventions grand public. Il faut démystifier les idées préconçues et aussi éviter les amalgames qui n'ont rien à voir avec les sciences.

3.3.4 Articles scientifiques dans la revue Photoniques


Cette revue bimensuelle offerte par la société française d'optique propose à chaque numéro un dossier « comprendre » qui vise à donner les clefs d'une technique expérimentale

Attention à l'interprétation

- Si un Qbit porte simultanément les deux valeurs 0 et 1

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + e^{i\varphi}\beta|1\rangle$$


- "Je peux envoyer deux fois plus d'information !"
- "Je peux faire du calcul en parallèle massif !"




NON !

Ce qui n'est pas quantique



Voyage instantané
dans le temps et l'espace





Médecine quantique



Pouvoirs paranormaux

Figure 3.3 – Titre de mon intervention : « *Que nous réserve l'ordinateur quantique ?* » destinée au grand public non scientifique.

à un public de scientifiques dans le domaine de l'optique. Ici le travail est aussi délicat car la rigueur scientifique est le maître-mot puisque nous nous adressons à des collègues mais il faut prendre garde à rester pédagogique sur les techniques expérimentales qui comportent beaucoup de jargon.

Sur les pages suivantes, vous trouverez :

- la première page de la version anglaise. « **Comprendre. Le comptage de photons corrélés en temps** », dans la revue *Photoniques*, Numéro 91, Mai-Juin 2018 <https://doi.org/10.1051/photon/20189138> – EDP Sciences
- la première page de la version française. « **Distriburion quantique de clef sur réseau déployé : enjeux et défis** », dans la revue *Photoniques*, Numéro 130, Mars-Avril 2025 <https://doi.org/10.1051/photon/202513035> – EDP Sciences

BACK TO BASICS: Time-tagging single photons

Olivier ALIBART

Virginia D'AURIA

Grégory SAUDER

Laurent LABONTE

Sébastien TANZILLI

Université Côte d'Azur,

CNRS, Institut de Physique

de Nice, France

olivier.alibart@inphyni.cnrs.fr

The analysis of time correlations between photons is the essence of quantum information processing protocols (communication, metrology and computing) presented in this special issue. These correlation measures are derived from fundamental quantum optical techniques formalised by R. Glauber in 1963 [Phys. Rev. 130, 2529] which enable the properties of electromagnetic fields to be measured, *i.e.* their fluctuations and signatures to be detected in a noisy signal. More generally, those fluctuations are the result of high order interferences and are, in certain cases, directly linked to the "traditional" coherence of the optical fields.

An analysis of the time correlations between two modes, 1 and 2, of the electromagnetic field takes the mathematical form of a normalised function such as

$$g_{1,2}^{(2)}(\tau) = \frac{\langle I_1(t)I_2(t+\tau) \rangle}{\langle I_1(t) \rangle \langle I_2(t) \rangle} = \frac{\langle :N_1(t)N_2(t+\tau): \rangle}{\langle N_1(t) \rangle \langle N_2(t) \rangle},$$

which enables to determine the degree of correlation of the fluctuations

of the optical intensities $I(t)$ of the two modes, observed at two instants separated by a duration τ . It should be noted that, from a quantum standpoint, we can also express this magnitude using the numbers of photons $N_i(t)$ in a mode i . An easy interpretation of $g_{1,2}^{(2)}(0)$ can be obtained in a simple experiment, as illustrated in Figure 1. It consists in comparing

the number of photons detected in each mode for each instant. If the time distribution of the photons in each mode is completely random and independent, then there is no correlation, which corresponds to a degree of correlation equal to 1. Conversely, if the time distributions of the photons are correlated, *i.e.* there is a photon simultaneously in each mode, then

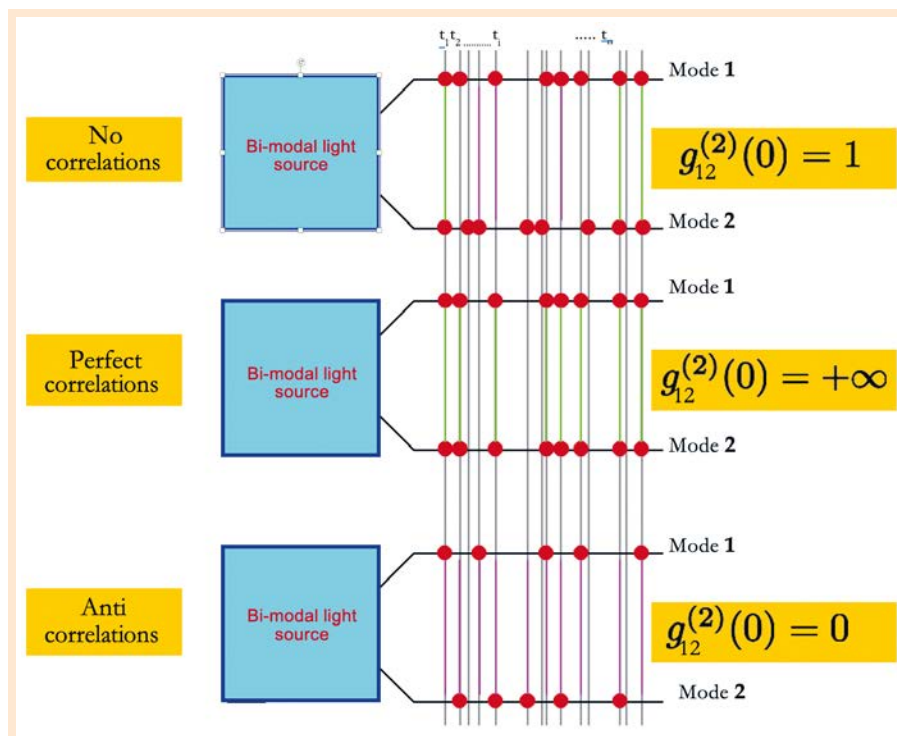


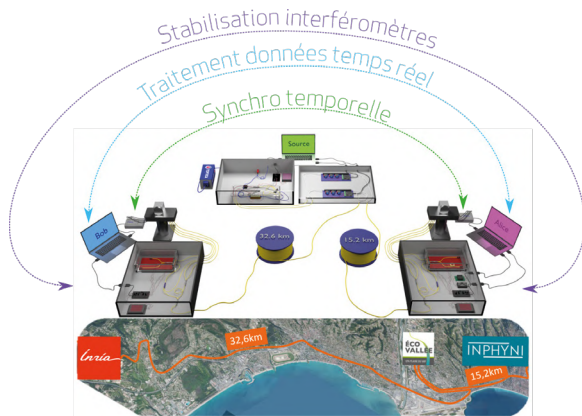
Figure 1. Analysis of correlations of the number of photons between two modes. The **correlations** (presence of a photon in each mode at instant t) are identified by a **green trace**, whereas the **anticorrelations** (presence of a photon only in one mode or the other) are identified by a **purple trace**. The aim in this case is to measure the correlations in the fluctuations of the light intensity between modes 1 and 2 over time. At the photon scale this corresponds to the conditional probability that a photon is present in mode 2, bearing in mind that a photon is present in mode 1. We have represented 3 (pedagogical) cases corresponding respectively to a photon pair source (perfect correlations), a coherent laser (complete lack of correlations) and a single photon source (perfect anticorrelations).

DISTRIBUTION QUANTIQUE DE CLEF SUR RÉSEAU DÉPLOYÉ : ENJEUX ET DÉFIS

Olivier ALIBART*, Virginia D'AURIA, Jean ETESSE, 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



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/202513037>

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 tâcherons 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 ●●●

Chapitre 4

Curriculum vitae détaillé

Nom, prénom : ALIBART Olivier

Date de Naissance : 07/12/1977

Grade : 3014 – Maître de conférence hors classe

Établissement d’affectation : Université Côte d’Azur

Section CNU : 30

Unité de recherche d’appartenance : INPHYNI UMR7010

Publications	41 articles dans des revues de rang A, 1 brevet, H-index= 25
Conférences	69 dont 26 invitations (avec ou sans proceeding)
Co-encadrement	13 doctorants et 18 Masters
Responsabilités scientifiques	Projets : PEPR, CNRS, ANR, FP7, Région, UCA Conseil académique université, conseil de laboratoire Review : projets, articles, thèses
Enseignements	192 h TP, TD et cours de L1 à M2
Responsabilités pédagogiques	Co-pilotage Master physique « Ondes, Atomes, Matière »
Diffusion scientifique	Traduction ouvrage, Organisation conférences, vulgarisation ...
Distinctions	« PEDR » 2010, 2014, 2018, 2023, délégation CNRS 2013

4.1 Déroulé de carrière

Lors de mon recrutement en 2006, mes activités de recherche se sont intégrées à celles de la toute nouvelle équipe de recherche sur l’optique quantique (composée du Pr. Ostrowsky et du Dr. Tanzilli) au sein du groupe optique guidée et non linéaire du Pr. Baldi au Laboratoire de Physique de la Matière Condensée (LPMC, UMR7336). Depuis, l’équipe a acquis son indépendance et s’est largement étoffée par le recrutement/intégration de trois enseignant-chercheurs et de deux chargés de recherche CNRS. Mes activités

de recherche ont évolué avec celle du groupe dont le rayonnement est maintenant bien établi à l'échelle internationale dans le domaine de la photonique quantique. En 2017, nous avons intégré l'Institut de Physique de Nice (InPhyNi), une Unité Mixte de Recherche (UMR 7010) de l'Université Côte d'Azur et du CNRS, qui est née de la fusion de deux laboratoires : l'Institut Non Linéaire de Nice (INLN, UMR7335) & le Laboratoire Physique de la Matière Condensée. Nous avons changé le nom de l'équipe, dirigée par S. Tanzilli, en : « Photonique et Information Quantiques ».

Mon activité de recherche initiale couvre l'utilisation de l'optique intégrée sur puce pour développer des dispositifs capables de répondre aux besoins des technologies quantiques. Au cours de ma carrière, j'ai acquis des compétences en termes de matériaux pour l'optique quantique, d'interférométrie quantique à plusieurs particules et d'optique non-linéaire. J'ai également acquis des connaissances en termes de techniques expérimentales de détection de photons, de mesures de corrélations et de technologies issues des télécommunications. Par conséquent, mes activités de recherche ne seraient se réduire à l'optique quantique intégrée et s'inscrivent désormais dans le cadre plus global des technologies quantiques à base de photonique, couvrant à la fois aspects fondamentaux et appliqués. Concernant l'aspect fondamental, une compréhension profonde des corrélations liées à l'intrication, des techniques de comptage de photons et d'interférométrie quantique, me permettent de participer ou de conduire des expériences fondamentales liées à l'optique quantique. Concernant l'aspect appliqué, je développe des systèmes photoniques guidés et intégrés, compatibles télécom, utiles à la communication quantique longue distance. Ces systèmes permettent la manipulation sur puces d'états quantiques configurables à la demande sur de nombreux degrés de liberté.

Actuellement, une de mes principales lignes de recherche concerne le déploiement d'un lien de communication quantique pour des tests en champ réel de protocoles de communication quantique. Cette activité vise à répondre aux questions liées au déploiement des réseaux quantiques hors des laboratoires, tels que la topologie optimale d'un réseau à N utilisateurs, la coexistence avec les réseaux de communication classiques ou encore la synchronisation temporelle des utilisateurs. Deux voies sont poursuivies simultanément : l'une à base de fibre optique (réseau local sur 100 km, en partenariat avec ORANGE) et l'autre via le segment spatial (en partenariat avec THALES ALENIA SPACE et l'Observatoire de la Côte d'Azur). Cette activité agrège autour d'elle de nombreuses collaborations aussi bien avec des universitaires autour de questions fondamentales qu'avec des industriels autour de questions plus appliquées. J'entretiens par exemple des collaborations avec GEOAZUR (OCA) concernant la distribution d'échelles de temps pour les besoins de la distribution quantique de clefs (QKD). J'entretiens également des collaborations avec le Laboratoire d'Informatique, Signaux et Systèmes de Sophia Antipolis (I3S) autour de l'intégration de protocoles de chiffrement (TLS) dans les bibliothèques standards exploitant des clefs échangées quantiquement. Du côté des industriels, THALES et ORANGE sont fortement impliqués dans nos développements expérimentaux de distribution d'information quantique en vue de s'établir comme les acteurs incontournables du futur grand « internet quantique ».

Sur la partie matériaux pour l'optique quantique, mon expertise couvre le niobate de lithium (thèse dans le groupe d'optique non-linéaire du LPMC), les fibres optiques (post-doc à l'université de Bristol avec J.G. Rarity), les guides inscrits par laser dans le verre au travers une collaboration avec le groupe de M. Steel à Macquarie University de Sydney et les semiconducteurs à base de nitrure de gallium au travers une collaboration avec J. Zuniga-Peres du CRHEA à Sophia-Antipolis pour le développement de sources de photons uniques novatrices fonctionnant à température ambiante.

Concernant l'enseignement, j'ai eu l'opportunité d'enseigner à peu près à tous les niveaux. J'ai commencé essentiellement en TP/TD en L1, L2 et L3 avec quelques cours magistraux liés à ma spécialité (optique quantique) dans des parcours en création comme le parcours « Philo-physique » de l'université de Nice Sophia Antipolis. Depuis, j'ai également largement enseigné la physique quantique en L3 et en Master, puis je me suis impliqué dans la mise en place et le co-pilotage du master de physique « Ondes, Atomes, Matière » de l'université Côte d'Azur.

Chronologie et moments clefs

1998–2001

Magistère de Physique Fondamentale et DEA “Laser et Matière”, Université PARIS-XI (Orsay)

2001–2004

Thèse de doctorat “Source de photons uniques annoncés à 1550 nm en optique guidée pour les communications quantiques” sous la direction de P. Baldi, Laboratoire de Physique de la Matière condensée, Université de Nice Sophia-Antipolis.

2004–2006

Post-doctorat dans le domaine des communications quantiques sur le développement d'une nouvelle génération de source de paires de photons intriqués à partir d'une fibre micro-structurée. Réalisation des portes logiques à base d'interférences quantiques dans l'équipe de J.G. Rarity à l'Université de Bristol.

2006

Enseignant-chercheur en information quantique sur le développement de composants avancés destinées aux réseaux de communications quantiques longue distance dans l'équipe “Quantum Information with Light & Matter” au Laboratoire de Physique de la Matière condensée, Université de Nice Sophia-Antipolis.

2013

Séjour de recherche dans le groupe de Michael Steel à Macquarrie University sur l'hybridation de deux technologies complémentaires pour la génération à haut débit de photons uniques annoncés.

2017

Création de l'Institut de Physique de Nice (InPhyNi UMR7010) issu de la fusion de deux laboratoires : l'Institut Non Linéaire de Nice, (INLN UMR7335) et le Laboratoire Physique de la Matière Condensée, (LPMC UMR7336)

2018

Mise en place et co-pilotage du Master de physique de Nice « Ondes, Atomes, Matière » avec F. Mortessagne, M. Bellec, M. Albert, C. Michel, C. Raufaste et C. Cohen.

2022

Co-pilotage avec E. Diamanti (LiP6) du Programmes et Équipements Prioritaires de Recherche (PEPR) France 2030 « QCommTestBed ». Ce projet à 5 M€ regroupe 9 grands acteurs français autour du développement d'un réseau de communication quantique en champ réel.

Coordination du projet ANR CIPHER-Q qui regroupe des équipes du Centre de Recherche sur l'Hétéro-Epitaxie et ses Applications (CRHEA) et du MajuLab à Singapour, autour de l'étude de sources de photons uniques aux longueurs d'ondes des télécommunications.

4.2 Activités scientifiques

Il faut noter que toutes les références de ce chapitre sont liées à la notice bibliographique personnelle du chapitre 5

4.2.1 Responsabilités scientifiques et animation de la recherche

Dans le cadre de mes activités de recherche, j'ai été impliqué dans plusieurs projets de recherche, à différents niveaux de responsabilité (participant, responsable d'un work-package ou coordinateur). Par la suite, je fais une présentation synthétique des projets de recherche qui sont achevés et je finirai par ceux, en cours, dans lesquels je suis actuellement impliqué au sein de l'équipe PIQ et qui constituent une partie de mes perspectives de recherche qui ont été abordées plus en détail au chapitre 2.

Projets achevés

PROJET CNRS – ROYAL SOCIETY 2008–2010

Dans l'idée de bâtir un réseau quantique commun pour échanger de l'information quantique, le projet propose de s'assurer de la compatibilité des photons émis par les différents utilisateurs de ce réseau quel que soit le type de source utilisée.

Lors de mon recrutement en 2006, toutes les expériences d'interférences entre sources indépendantes impliquaient des sources strictement identiques. Une partie de mon projet de recherche reposait sur la démonstration d'interférences quantiques entre deux sources différentes que j'avais développé en thèse et en post-doc. Ce travail s'inscrivait donc comme une collaboration entre notre équipe et celle de J.G. Rarity de l'université de Bristol. J'ai disposé d'un financement de 4k€ nous permettant des échanges bilatéraux réguliers pour mettre en place l'expérience finale qui a été publiée en 2013 [20]. L'originalité de l'approche reposait sur l'utilisation d'un laser picoseconde à 1064 nm qui servait à alimenter deux types de sources différentes, l'une d'elles nécessitant une conversion de fréquence vers 532 nm pour fonctionner. Ce travail a semé les bases du projet CONNEQT en 2011. Par ailleurs, ces échanges ont également permis de prolonger mon travail post-doctoral avec la publication commune [27] en 2011. Nous avons gardé un lien privilégié avec le groupe de Bristol avec qui nous échangeons des étudiants (D. Aktas, C. Torre, Y. Pelet, ...) et collaborons sur des aspects spécifiques de nos activités.

PROJET ANR BLANC E-QUANET 2009–2013

Le but du projet e-QUANET consiste à réaliser pour la première fois un embryon de réseau quantique au sein duquel la génération, la distribution et le stockage de l'information quantique sont possibles.

Il s'agit véritablement du premier projet ANR initié par S. Tanzilli et moi. En s'appuyant sur notre savoir-faire et celui du Laboratoire Aimé Cotton d'Orsay (LAC) et du laboratoire de l'école Telecom ParisTech, nous avons proposé la démonstration des 3 éléments de base d'un réseau quantique, c'est-à-dire, une source d'intrication aux longueurs d'onde télécom, une interface de changement cohérent de longueur d'onde, ainsi qu'une mémoire quantique. Le niveau d'ambition était très élevé et la difficulté expérimentale (et conceptuelle) résidait dans la compatibilité des 3 dispositifs. Le projet était porté par Sébastien Tanzilli et j'étais le responsable scientifique du workpackage « interface ». Il s'agissait en particulier de produire une source de photons intriqués en polarisation à 1560 nm et, par ailleurs, d'assurer la somme de fréquence cohérente d'un des deux photons avec un champ optique à 1600 nm pour obtenir un photon à 790 nm (la transition d'une mémoire atomique développée par le LAC) en maintenant l'intrication initiale. J'ai contribué aux développements expérimentaux des sources d'intrications [18,21] et de l'interface de conversion cohérente de fréquence [11].

PROJET EUROPÉEN FP7 QUANTIP 2009–2013

L'objectif principal du projet est de développer les outils, les composants et les concepts qui permettent de progresser vers la réalisation de circuits intégrés photoniques hautement évolués pour le traitement de l'information quantique, pour les communications quantiques et la métrologie quantique.

Ce projet s'inscrivait dans la continuité de notre collaboration avec le groupe de Bristol sur le développement de composants intégrés multi-plateforme pour les technologies quantiques. Ce projet européen, porté par l'université de Bristol, réunissait les universités de Eindhoven, Rome, Würzburg, MacQuarie et Nice. J'ai été impliqué dans les développements scientifiques qui ont conduit à la réalisation d'une puce de niobate de lithium intégrant toutes les fonctions nécessaires à la démonstration d'un relais quantique [23]. Par ailleurs, j'ai été responsable du workpackage « dissémination » consistant à assurer le partage des connaissances intra-consortium, la diffusion d'information aux instances dirigeantes et grand public (<https://seis.bristol.ac.uk/phmgt/quantip/HOME.html>). J'ai également contribué à la mise place d'une collaboration avec des groupes tels que MacQuarie qui ont conduit aux sources hybrides à base de verre et niobate de lithium [19,14] à partir de 2014.

PROJET ANR EMERGENCE CONNEQT 2011–2014

Le projet CONNEQT a pour ambition de démontrer l'échange d'intrication par téléportation quantique entre deux sources indépendantes sur une distance de 100 km ce qui représentait, à l'époque, un record absolu. En combinant une approche fondamentale et technologique, le projet s'articule autour d'une solution de synchronisation à très haute vitesse en s'appuyant sur le savoir-faire des télécommunications classiques.

Ce projet est issu de nombreuses réflexions communes sur les interférences entre sources indépendantes et sur la difficulté d'assurer leur synchronisation. Il est à l'origine du brevet que nous avons déposé avec L. Labonté, V. D'auria, A. Martin et S. Tanzilli. J'étais responsable du workpackage dédié à la téléportation d'intrication qui constitue la phase finale du projet. Nous avons démontré une source de paires de photons à très haut débit [17], alimentée par le laser de synchronisation à haute cadence et quelques années plus tard la mise en réseau de deux d'entre elles ainsi que l'observation d'interférences quantiques au cœur du principe des réseaux de communication quantique [5]. Ces travaux très fondamentaux ont contribué à la naissance de notre projet actuel de cryptographie quantique au sein de la métropole Nice-Côte d'Azur (Quantum@UCA 2016–2021).

PROJET RÉGION PHOQUINT 2012-2014

Scientifiquement à mi-chemin entre le projet QUANTIP et CONNEQT, j'ai été le porteur d'un projet de recherche exploratoire financé par la région PACA. Il s'agissait de fusionner les concepts de pompage à haut débit (CONNEQT) et la réalisation de dispositifs intégrés capables de produire des états quantiques avancés (QUANTIP). Nous avons bénéficié de crédits nous permettant de nous équiper de lasers et dispositifs de datation temporelle qui nous ont permis de réaliser des expériences nécessitant la manipulation de plusieurs paires de photons simultanément sur puce. Ces expériences pionnières en termes de concept et de complexité expérimentale ont conduit aux papiers suivants : [19,14].

PROJET ITN PICQUE 2013–2017

« Photonic Integrated Compound Quantum Encoding » – PICQUE – est un réseau de formation Marie Curie impliquant 18 partenaires de 7 pays européens différents et vise à former la nouvelle génération de spécialistes de l'information quantique.

Ce projet européen, dans la continuité de QUANTIP était porté par l'université de Rome. Le responsable pour la France est S. Tanzilli et j'ai été très fortement impliqué dans le projet en définissant les objectifs scientifiques et la formation à plein temps du doctorant (P. Vergyris) et du post-doc (T. Lunghi) recrutés, mais aussi en organisant l'école scientifique d'hiver. Nous avons significativement fait progresser la complexité des dispositifs réalisés qui ont en commun l'exploitation systématique des interférences à deux photons pour « construire » des états quantiques avancés [7,9,11,14].

PROJET ANR INQCA 2014–2017

INQCA vise la réalisation et l'optimisation de circuits quantiques, intégrés sur puce de niobate de lithium, permettant d'atteindre une complexité et une flexibilité inégalées. L'ambition majeure du projet réside dans l'intégration dense de sources de paires de photons et de réseaux de guides d'ondes couplés et fonctionnalisés.

Il s'agissait d'une collaboration avec le Centre de Nanosciences et de Nanotechnologie (C2N) de l'université de Paris-Saclay avec une expertise en « guidonique », autrement dit la manipulation de la lumière au moyen de réseaux de guides couplés et le Research Center on Advanced Materials and Technologies (RAMTECH) de l'université de Iasi (Roumanie), avec une expertise en fabrication de structures guidantes sur niobate de lithium. J'ai été le responsable du workpackage dédié à la démonstration d'interférences à deux photons dont la fonction d'onde était « délocalisée » sur plusieurs modes discrets. C'était un projet très ambitieux, situé à la limite de la topologie quantique qui n'a produit que peu d'articles. Nous avons toutefois démontré un coupleur intégré insensible à longueur d'onde, similaire au transfert adiabatique de population par effet Raman stimulé [12] et il faut noter que ce projet est à l'origine de mes activités de recherche sur l'utilisation de l'intrication pour étudier les phases topologiques et faire de la simulation quantique (voir projet « SNATCH »).

PROJET PACA : SNATCH 2018–2020

La simulation de systèmes physiques est un des grands défis des technologies quantiques. Le projet SNATCH explore ce challenge en proposant une étude théorique et expérimentale du modèle de Bose-Hubbard en exploitant des paires de photons intriqués dans des circuits optiques à 3 dimensions.

J'ai été le porteur d'un projet de recherche exploratoire financé par la région PACA et le CNRS à hauteur de 100k€ pour l'exploration expérimentale de simulation quantique sur puce photonique. Il s'agit d'un projet structurant qui réunit trois jeunes chercheurs de l'InPhyNi, de thématiques différentes, pour créer une dynamique autour de nouveaux axes de recherche. En associant l'expertise théorique de M. Albert et le savoir-faire de M. Bellec dans la fabrication de structures guidantes 3D dans le verre, nous avons cherché à exploiter le potentiel de la photonique quantique intégrée pour la simulation quantique. En effet, la maîtrise de la cohérence et des degrés de liberté, pour « encoder » le système quantique à émuler, qu'offre la photonique quantique font de cette approche un candidat sérieux face aux solutions à base de qbits solides comme les atomes ou les ions ... Nous avons conduit un travail d'investigation théorique et numérique qui a essentiellement montré que la simulation se limiterait à des systèmes à deux particules avec interaction mais sans intrication. Dans ce cadre, j'ai supervisé le développement d'une source d'états à deux photons annoncés dont l'état quantique est contrôlable [4] et compatible avec les structures 3D correspondant au hamiltonien à simuler.

PROJET QUANTUM@UCA 2017–2021

Mise en place d'un lien de cryptographie quantique à base d'intrication à l'échelle de l'université Côte d'Azur.

Il s'agit d'un projet phare de l'université Côte d'Azur financé par l'IDEX à hauteur de 300k€, impliquant de nombreux acteurs de l'Université Cote d'Azur (INRIA, ARTELMIS, ORANGE, INPHYNI) autour du développement d'un lien fibré (50 km) de distribution quantique de clefs entre Nice et Sophia-Antipolis, devenant ainsi un véritable laboratoire à ciel ouvert pour le déploiement de technologies et de protocoles d'information quantique. Ce projet couvre des concepts fondamentaux comme la génération de paires de photons intriqués pour une communication longue distance ou la réalisation d'interféromètres ultra-stables, mais également des aspects très appliqués comme la synchronisation temporelle (à la nanoseconde près) des différents sites qui constituent le réseau et l'extraction de la clef secrète à partir des mesures de corrélation. Je suis très fortement impliqué à tous les niveaux, au travers l'encadrement du doctorant X. Hua, Y. Pelet, V. Dumas et T. Prévost mais aussi pour les développements scientifiques des sources, des interféromètres et de la synchronisation. J'ai également une grande responsabilité organisationnelle dans le déploiement pratique du lien fibré. Une démonstration de lien opérationnel de QKD sur 50 km pendant plus de 30 h en continu a été faite dans l'article [2].

PROJET ANR/ASTRID LIGHT 2018–2021

LIGHT vise à développer des sources innovantes de photons uniques haut-débit associés à des sources non-linéaires de paires de photons intriqués et leur implémentation au sein d'un lien opérationnel de cryptographie quantique en champ réel.

Dans l'esprit du projet Q@UCA, il s'agit ici d'exploiter le lien fibré pour effectuer de la distribution quantique de clés à base de véritables photons uniques. En collaboration avec le C2N et la start-up Quandela, il s'agit de développer une source de photons uniques la plus efficace qui soit et d'assurer la différence de fréquence des photons émis de 920 nm vers 1560 nm. Le projet est dirigé par S. Tanzilli et je suis impliqué à 50% comme participant. Mon rôle s'établit sur la partie conversion de fréquence des photons uniques mais également sur la distribution et l'implémentation au sein du réseau Q@UCA. Les défis à relever se situent au niveau de la brillance globale correspondant à la génération des photons uniques et leur conversion de fréquence qui doit rester au-delà de 30% pour assurer un débit au niveau de l'état de l'art mondial. À plus long terme, les enjeux se situent au niveau fondamental sur la réalisation de téléportation d'états quantiques sur le réseau fibré via un couplage avec une source de paires de photons intriqués.

PROJET DOEBLIN : SPARTA 2020-2021

L'objectif du projet est d'étudier l'émission de photons uniques à partir de défauts dans la maille de GaN.

Je suis le porteur d'un projet de recherche structurant financé par la fédération Doebelin à hauteur de 30k€. L'objectif de ce projet est d'initier des projets émergents au sein de l'université Côte d'Azur. En collaboration avec J. Zuniga-Peres du CRHEA, nous comptons réaliser une source de photons uniques novatrice par différents aspects : son fonctionnement s'effectue à température ambiante, les photons sont naturellement (pas de conversion comme dans le projet LIGHT) émis aux longueurs d'ondes des télécom et le taux d'émission est intrinsèquement très élevé. L'idée est d'exploiter des défauts qui émettent à 1300 nm et qui ont été identifiés dans la maille cristalline de GaN par le groupe de W. Gao à Singapour. En collaboration avec le CRHEA, les défis du projet sont de comprendre le mécanisme de production des photons uniques et de décaler leur émission vers 1550 nm. Mon niveau d'implication est maximal puisque j'ai initié la collaboration, rédigé le projet et j'assure les réunions d'avancement du projet. Ce projet, incluant l'utilisation de telles sources pour faire de la QKD sur le réseau fibré Q@UCA, a fait l'objet d'une demande ANR financée en 2022 CIPHER-Q.

PROJET CNES R&T RIQS 2020-2021

L'obstacle majeur au déploiement de réseau quantique réside dans la distance limitée (~ 100 km) du lien, en raison des pertes dans les fibres optiques ou de la courbure de la Terre. En l'absence de répéteurs quantiques fiables, le segment spatial représente la seule voie potentielle. À ce jour, les seules véritables démonstrations ont été faites en Chine (satellite Micius), mais de nombreux projets sont en cours à l'international. L'objectif est de fournir un rapport d'étude concernant les Réseaux d'Information Quantique par Satellite (RIQS) pour mettre en place une solution spatiale française.

Il s'agit d'une étude commandée par le CNES qui réunit Sorbonne Université, Université Grenoble-Alpes, l'université Côte d'Azur et la société Thalès Alenia Space. Le projet est dirigé par M. Van Den Bossche (TAS) et dans lequel j'interviens comme participant avec A. Martin et S. Tanzilli. Ici, ce sont mes expertises en termes de design de sources, de mise en place de protocoles de communication quantique et de synchronisation de réseau quantique qui sont exploitées pour identifier les besoins utilisateurs, l'état de l'art, l'architecture abstraite du réseau pour ensuite proposer une première sélection de solutions et finalement identifier les premiers éléments d'un démonstrateur spatial. L'objectif est réellement de justifier la faisabilité d'un démonstrateur en orbite et au sol qui sera ensuite financé par le CNES. Ce travail d'investigation a conduit à l'article [3] qui couvre tous les aspects d'une communication quantique à base de liens satellitaires.

PROJET ANR/ASTRID SOLUQS 2020–2023

SoLuQS a pour ambition de construire des prototypes industriels de type « sources d'intrication » répondant aux contraintes de la spatialisation, sans compromettre leurs performances.

Dans la lignée du développement d'un réseau quantique spatial, ce projet réunit à nouveau Sorbonne Université, l'université Côte d'Azur et la société Thalès Alenia Space. En pratique, cela passe par la conception et la réalisation de sources de photons intriqués spatialisables, c'est-à-dire possédant l'ensemble des caractéristiques nécessaires afin d'être embarquées à bord de systèmes aéroportés. Le projet est dirigé par A. Martin et je suis responsable du workpackage concernant le développement de sources de photons intriqués à très haut débit. Pour cela, il va falloir identifier des solutions techniques pour offrir une source à très large spectre qui puisse soutenir un encodage en polarisation ou en énergie-temps avec, comme contraintes majeures, la compacité, la résilience aux vibrations et variations de température, mais principalement la consommation électrique. Je suis donc impliqué fortement dans le développement de la source et la conduite du projet au travers les choix scientifiques qui sont faits. Un article est en cours d'écriture.

Projets en cours : Réseaux quantiques au sol et dans l'espace**PROJET ANR CIPHER-Q 2022–2026**

Le développement de sources de photons uniques à la longueur d'onde des télécom est motivé par le besoin de véritables sources de lumière quantique pour les communications sécurisées. Dans le cadre du projet CIPHER-Q, trois équipes dans le domaine des semi-conducteurs et de la communication quantique se sont associées pour développer une source de photon unique à base de GaN injectée électriquement, fonctionnant à température ambiante et émettant à $1,3\mu\text{m}$ pour la distribution de clefs quantiques dans un réseau de fibre optique de 50 km de long.

Je suis le porteur de ce projet ANR regroupant le CRHEA et MAJULAB (Singapour) autour de l'investigation des défauts dans le GaN et leur mise en forme pour réaliser des dispositifs émetteurs de photons uniques déployables en champ réel. Le projet dispose d'un budget de 680k€ pour une durée de 42 mois. Les enjeux ici consistent à comprendre les mécanismes d'apparition des défauts dans la maille cristalline de GaN afin de pouvoir nano-structurer le matériau et d'optimiser l'extraction des photons uniques. Mon expertise intervient dans la manipulation de ces photons uniques à des buts de distribution quantique de clefs sur le réseau Q@UCA.

PROJET ANR-PEPR QCOMMTESTBED 2022–2027

Ce projet intégré vise à doter la France d'un testbed coordonné à l'échelle nationale, utilisé pour des démonstrations d'applications de communication quantique. Son ambition est de servir d'accélérateur des technologies développées au niveau national, allant de l'étape d'un système de laboratoire jusqu'au produit commercial, en les testant dans des conditions de terrain et avec des benchmarks de performances liés à des protocoles avancés et des cas d'usage associés.

Je suis le coordinateur principal avec Eleni Diamanti du LiP6 de ce projet à l'échelle nationale qui regroupe 9 acteurs académiques français autour des communications quantiques en champ réel pour une durée 60 mois. Ce projet à 5 M€ vise le déploiement d'un lien de cryptographie quantique à base de fibre mais également d'explorer les bases d'un lien en espace libre entre les sites de Nice et de Paris. Un volet également important concerne le développement de dispositifs de photonique quantiques performants mais également des systèmes d'évaluation pratique de la sécurité.

PROJET DIGITAL EUROPE FRANCEQCI 2022–2025

FranceQCI vise à donner l'impulsion nécessaire à la création d'une future infrastructure française de communication quantique (QCI), qui s'inscrit dans le cadre européen du programme EuroQCI visant la démonstration d'un réseau quantique à l'échelle européenne.

Le projet FranceQCI est porté par ORANGE et il réunit pour la première fois tous les principaux acteurs de la distribution de clefs quantiques (QKD), de la sécurité et des potentiels utilisateurs en France au sein d'une large communauté interdisciplinaire de 11 partenaires (industriels et académiques). Je suis le coordinateur local en charge de la synergie avec le fonctionnement du réseau quantique opérationnel sur Nice. Dans le cadre du projet, mon rôle consiste à fournir des retours sur expérience aux autres partenaires mais également d'étendre le réseau jusqu'à l'observatoire astronomique de Caussols afin de poser les premières pierres d'une liaison grande distance vers Paris ou les autres villes européennes via un satellite.

PROJET CNES R&T PRORIQS 2023-2024

L'objectif de cette étude est de spécifier et concevoir un prototype de récepteur pour les réseaux d'information quantique. L'étude s'inscrit dans la préparation d'une approche à long terme visant à bâtir une infrastructure de dorsale quantique satellitaire/terrestre permettant l'interconnexion de dispositifs quantiques utilisateurs (i.e. nœuds de communication quantique tels que des commutateurs quantiques, calculateurs quantiques, senseurs quantiques, analyseurs quantiques...) par le principe d'échange d'intrication.

Il s'agit de la suite de l'étude RIQS qui réunit à nouveau Sorbonne Université, Université Grenoble-Alpes, l'université Côte d'Azur et la société Thalès Alenia Space autour du design et de la réalisation d'un prototype de récepteur (télescope et analyseur d'état quantique) compatible avec les satellites déjà en place. Le projet est toujours dirigé par Thalès et je suis, cette fois, le coordinateur local.

4.2.2 Encadrement doctoral et scientifique

2004–2006

Co-encadrement à 50% avec le professeur J.G. Rarity, débuté durant mon activité post-doctorale (2004-2006). Lors de ma prise de fonction de maître de conférences à l'université de Nice en Septembre 2006, j'ai activement continué à assurer l'encadrement de J. Fulconis au moyen de visites bilatérales régulières. J. Fulconis a obtenu un poste d'attaché aux nouvelles technologies au conseil régional de Provence Alpes-Côte d'Azur depuis Janvier 2010. Articles : [27,33,34,35,37]

2005–2008

Co-encadrement de la thèse de Pierre Aboussouan à hauteur de 50% avec S. Tanzilli. Cette thèse a permis de démontrer la réalisation de téléportation d'intrication entre deux sources de paires de photons opérant en régime picoseconde aux longueurs d'onde des télécommunications à l'origine du projet CONNEQT. Pierre Aboussouan est actuellement professeur agrégé de physique en lycée et classe préparatoire. Articles : [29]

2008–2011

Co-encadrement de la thèse d'Anthony Martin à hauteur de 50% avec Sébastien Tanzilli. Cette thèse a abouti à la réalisation de plusieurs sources de paires de photons intriqués en polarisation à base d'optique guidée et à la toute première démonstration d'une puce réalisant la fonction de relais quantique pour les communications longue distance. Anthony Martin est maintenant enseignant-chercheur à l'institut de Physique de Nice. Articles : [22,23,24,28,30,31]

2009–2012

Co-encadrement de la thèse de Florian Kaiser à hauteur de 40% avec S. Tanzilli. Cette thèse a conduit à la réalisation de sources d'intrication photonique novatrices trouvant des applications pour les communications quantiques mais également l'optique quantique fondamentale. En particulier, nous avons démontré une source capable de générer de l'intrication en polarisation via un convertisseur d'observable temps/polarisation construite uniquement autour de composants standards de l'optique intégrée et des télécommunications optiques. Pour la toute première fois, la bande spectrale des photons peut être choisie sur plus de cinq ordres de grandeur (25 MHz - 4 THz), rendant la source compatible avec toute une variété d'applications avancées, tels que la cryptographie, les relais et les mémoires quantiques. Florian Kaiser est maintenant chercheur à l'Institut de Science et Technologie au Luxembourg. Articles : [18,21] et prix de thèse de la Société Européenne de Physique.

2012–2015

Co-encadrement de la thèse de Lutfi-Arif Ngah à hauteur de 33% avec S. Tanzilli et V. D'Auria. Dans le cadre du projet CONNEQT, nous avons démontré la réalisation d'une source de paires de photons ultra rapide pour la réalisation d'un protocole de téléportation d'intrication sur longue distance. Lutfi-Arif Ngah occupe un poste de chef d'équipe-projet dans un data center à Singapour. Articles : [17,19]

2013– 2016

Co-encadrement de la thèse de Djeylan Aktas à hauteur de 25% avec S. Tanzilli et L. Labonté. Cette thèse s’articulait autour de l’étude de la cohérence de la lumière produite à partir de sources de paires de photons intriqués et de micro-lasers. Djeylan Aktas est actuellement chercheur à l’Institute of Physics of the Slovak Academy of Sciences. Articles : [8]

2014–2017

Co-encadrement de la thèse de Bruno Fedrici à hauteur de 15% avec S. Tanzilli et V. D’Auria. Cette thèse est dans la continuité du travail de Lutfi-Arif Ngah et a permis de démontrer expérimentalement la synchronisation tout optique de sources de paires de photons ultra rapides et la réalisation d’un protocole de téléportation d’intrication sur 100 km. Bruno a créé sa société de consulting et de formation en technologies quantiques. Articles : [5]

Co-encadrement de la thèse de P. Vergyris à hauteur de 50% avec S. Tanzilli. Cette thèse rentre dans le cadre du projet PICQUE et concerne la réalisation de circuits d’optique intégrée pour la génération et la manipulation d’états quantiques avancés. Parmi ses nombreux résultats, la réalisation majeure est une puce optique permettant de générer et manipuler 4 photons. Panagiotis Vergyris occupe actuellement un poste de chef d’équipe-projet dans la société Specto Photonics. Article : [7,9,11,13,14]

2018–2021

Co-direction (avec dérogation) de la thèse de Xin Hua à hauteur de 80% avec S. Tanzilli. Cette thèse s’inscrit dans le cadre du projet Quantum@UCA et concerne la réalisation d’un lien opérationnel de cryptographie quantique à l’échelle de l’université Cote d’Azur. Nous avons principalement réalisé une puce monolithique de niobate de lithium très avancée assurant l’émission de paires de photons annoncées dont l’état est ajustable. Xin Hua a soutenu sa thèse en Mars 2021 et il est retourné dans son pays d’origine (Chine) pour prendre un emploi de cadre chez Huawei. Articles : [4,6]

2019–2022

Co-encadrement de la thèse de Alek Lagarrigue à hauteur de 33% avec S. Tanzilli et A. Martin. Alek bénéficie d’une bourse de thèse du CNES et celle-ci s’inscrit dans le cadre du projet SOLUQS / RIQS / PRORIQS. Nous avons développé une source de paires de photons intriqués spatialisable, c’est à dire dont les dimensions et le design lui permettent d’être intégrée à bord d’un satellite. Alek a soutenu sa thèse en Juin 2023 et un article est en cours d’écriture sur la source qu’il a développée durant son contrat.

Alek occupe actuellement un poste de responsable projet dans la startup Quantum Optics Jena. Article : [3]

2020–2023

Co-encadrement de la thèse de Yoann Pelet à hauteur de 33% avec S. Tanzilli et A. Martin. Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet Quantum@UniCA et concerne la réalisation d'un lien opérationnel de cryptographie quantique à l'échelle de l'université Côte d'Azur. Le travail de Yoann a consisté à développer une source d'intrication photonique transportable capable de fonctionner, de façon autonome, en milieu « hors-laboratoire ». Il a également contribué au développement des logiciels de traitement de données indispensable à la distribution quantique de clefs en temps réel ainsi qu'à l'élaboration du protocole de synchronisation. Article : [2]. Yoann a soutenu sa thèse le 6 Mai 2024. Il est actuellement post-doc dans notre équipe pour finaliser le projet FranceQCI de QKD sur 100 km.

2023–2026

Co-direction de la thèse de Valentin Dumas à hauteur de 80% avec S. Tanzilli. J'ai officiellement demandé une dérogation pour pouvoir co-diriger cette thèse qui s'inscrit dans la ligne directe de mes activités de recherche financées par les projets QcomTestBed et FranceQCI. Il s'agit de déployer un lien de QKD qui exploitera à la fois la station sol optique de l'observatoire de Caussol ainsi que le lien fibre optique pour faire une preuve de principe de lien quantique entre une zone urbaine et un satellite basse orbite.

2023–2026

Co-encadrement de la thèse de Thomas Prévost à hauteur de 50% avec B. Martin de l'I3S. L'objet de la thèse vise à intégrer un protocole quantique de distribution de clefs pour remplacer un mécanisme standard de transport de clefs basé sur la cryptographie asymétrique. Ce remplacement sera intégré dans une des bibliothèques standard implémentant le protocole TLS (OpenSSL ou LibreSSL par exemple) pour assurer la confidentialité de la communication.

2024–2027

Co-encadrement de la thèse de Nathan Lecaron à hauteur de 50% avec J.Zuniga-Perez du CRHEA. La thèse vise le développement de sources de photons uniques à la longueur d'onde des télécom à base de GaN injectée électriquement, fonctionnant à température ambiante et émettant à $1,3\,\mu\text{m}$ pour la distribution de clefs quantiques dans un réseau de fibre optique de 50 km de long.

4.2.3 Expertise, rayonnement et diffusion

EXPERTISE :

- Évaluation de projets IDEX pour l’université de Grenoble.
- Évaluation de projets ANR.
- Évaluation de bourses CIFRE pour l’ANRT. (www.anrt.asso.fr)
- Évaluation de projets pour la “Grant Agency of the Czech Republic” (www.gacr.cz/en/).
- Évaluation de projets pour Macquarie University Research Fellowship (www.research.mq.edu.au/for/researchers/applying_for_grants/internal_funding/mqrf)
- Membre du comité d’évaluation des projets européens QUANTERA 2023.

ORGANISATION DE COLLOQUES

- Responsable organisationnel du colloque annuel de la Société Française d’Optique, OPTIQUE 22, qui a eu lieu en Juillet 2022 à Nice.
- Responsable organisationnel principal (président local) du GDR IQFA qui a eu lieu en Décembre 2017 à Nice.
<https://iqfacolloq2017.sciencesconf.org/>
- Responsable scientifique et organisationnel principal de l’école scientifique PICQUE qui a lieu en Février 2017 à Nice.
<https://picque-nice-17.sciencesconf.org/>
- Membre du comité local d’organisation de la conférence internationale ECIO-MOC qui a lieu en 2014 à Nice : <http://www.atout-org.com/eciomoc2014/>

ACTIVITÉS ÉDITORIALES

- Reviewer régulier pour les revues : Applied Physics B, Journal of the Optical Society of America B, Optics Express, Laser Physics Journal, Optics communications, Nature, Physical Review Letters et Physical Review A.

PARTICIPATION À DES JURYS DE THÈSE

- “Thesis Examiner” en Angleterre. Il faut noter que le protocole anglo-saxon repose sur la présence d’uniquement un examinateur externe et un examinateur interne qui sont conduits à juger des connaissances du candidat quant à son travail de thèse et d’une façon plus générale en physique.
 1. D. Bonneau à l’université de Bristol (UK).
 2. A. Santamato à l’université de Bristol (UK).
- “Thesis Examiner” en Australie. Il faut noter que la distance qui sépare l’Australie des principaux continents, impose une lecture poussée du manuscrit par un chercheur non australien et la production d’un rapport détaillé qui s’accompagne si besoin d’une visio-conférence.
 1. F. Lenzini à l’université de Griffiths en Australie.
 2. M. Rambach à l’université de Queensland en Australie

DIFFUSION

- Membre actif de l'association « Sciences pour Tous » depuis sa création en 2019. Il s'agit d'une association loi 1901 composée de spécialistes ou chercheurs et enseignants-chercheurs de tous les organismes d'enseignement et de recherche des Alpes-Maritimes et de Monaco. Elle a pour objet d'organiser et de favoriser la diffusion de la culture scientifique dans les Alpes-Maritimes en organisant des cycles de conférences, sur toute l'année dans la plupart des communes du 06.
Titre de mon intervention : « *Que nous réserve l'ordinateur quantique ?* »
- En collaboration avec S. Tanzilli, traduction de l'anglais vers le français du livre « Quantum Computer Science, an introduction » de N. David Mermin (Cambridge University Press, 2007, ISBN : 978-0-521-87658-2), publié en 2010 sous le titre « **Calculs et Algorithmes Quantiques, méthodes et exemples** » (EDP Sciences, 2010, ISBN :978-2-7598-0395-8).
- Participation au projet « Big Bell test » (<https://thebigbelltest.org/>) avec l'équipe « photonique et information quantique ». Le 30 Novembre 2016, 9 expériences ont été menées simultanément par les équipes de recherche à travers le monde qui ont utilisé des flux de bits aléatoires produits en temps réel par les Bellsters (des hommes et des femmes qui ont généré, via un jeu vidéo ou une application mobile, des chaînes de bits aléatoires) pour implémenter la violation des inégalités de Bell dictée par des choix humains. **Article [13]**
- Réalisation d'une animation vidéo avec deux étudiants en design et arts graphiques de l'école de Condé à Nice. Sous ma supervision scientifique, R. Dalonis, B. Viale ont réalisé une vidéo grand public pour expliquer les corrélations quantiques et l'importance du Big Bell test auquel mon équipe a participé. **The Big Bell test : Qu'est ce que les corrélations quantiques ? :**
<https://www.youtube.com/watch?v=yN04Drocqu4>
- Enregistrement d'une captation vidéo pour le service communication de l'Université Côte d'Azur : **Décodeur Minute - Communication quantique : vers une sécurisation totale des données ? :**
<https://www.youtube.com/watch?v=EtRY7jfRoZ8>
- Publication d'une notice pédagogique sur le comptage de photons : « **Comprendre. Le comptage de photons corrélés en temps** », dans la revue *Photoniques*, Numéro 91, Mai-Juin 2018 <https://doi.org/10.1051/photon/20189138> – EDP Sciences
- Traduction de la notice pédagogique sur le comptage de photons en anglais : « **Back to basics : Time-tagging single photons** », dans la revue *Photoniques Special EOS Issue*, Mai 2019 <https://doi.org/10.1051/photon/2019S454> – EDP sciences
- Publication d'un article de vulgarisation sur la QKD : « **Distribution quantique de clefs sur un réseau déployé** », dans la revue *Photoniques*, Numéro 130, Mars-Avril 2025 <https://doi.org/10.1051/photon/202412933> – EDP Sciences

4.3 Activités pédagogiques

4.3.1 Activités d'enseignement

Depuis mon recrutement en 2006, j'ai eu l'opportunité d'enseigner à peu près à tous les niveaux. J'ai commencé essentiellement en TP/TD en L1, L2 et L3 avec quelques cours magistraux liés à ma spécialité (optique quantique) dans des parcours en création comme le parcours « Philo-physique » de l'université de Nice Sophia Antipolis. Depuis le début de ma carrière, j'ai renouvelé volontairement mes enseignements à intervalles réguliers ce qui m'a conduit à enseigner essentiellement en TD de nombreuses disciplines comme la relativité, la thermodynamique, la mécanique du point, la physique des ondes, l'électrocinétique, l'électromagnétisme, la physique atomique et évidemment la physique quantique. En résumé, j'ai donc couvert des TP, TD et cours magistraux en L1, L2, L3, M1 et M2 et les cours que je dispense cette année n'ont plus rien en commun avec ceux que j'ai pu faire les premières années de mon recrutement.

Les TP et les TD sont une facette de l'enseignement qui me tient particulièrement à cœur car ils offrent l'occasion d'interagir avec les étudiants en petits groupes et de jauger leurs difficultés face à certains concepts. C'est l'occasion d'apporter un éclairage nouveau sur les concepts abordés en cours dans un cadre beaucoup moins strict qu'un cours magistral. C'est fort de cette expérience que je me suis fortement impliqué avec O. Legrand et A. Kastberg dans l'élaboration du contenu des TD (mais également du cours) des UE de physique quantique en L3 et de physique quantique avancée en M1 dans lesquels j'interviens respectivement depuis 2020 et 2018. J'ai également construit intégralement le cours et les TD d'optique statistique et quantique en M2 que j'ai dirigés de 2012 à 2021.

Enfin, j'ai également mis en place ou participé à des enseignements novateurs dans lesquels la pédagogie et le besoin de capter l'attention du public prenaient une place prépondérante, je peux citer :

- Les cours d'optique quantique et d'optique ondulatoire dans une formation transversale comme le parcours de Licence Philo-Physique en partenariat avec l'UFR de Lettres de Nice.
- Les cours/TD à deux voix avec un informaticien réseau sur le WIFI et ses concepts physiques en L3 pro réseau et télécoms de l'IUT de Nice (<http://lprt.unice.fr/>)
- L'introduction à l'information quantique en L1 informatique de l'université Côte d'Azur.
- Des TD de pédagogie innovante (sous la direction de F. Blanc) sur l'apprentissage de la physique par résolution de problèmes.
- Un cours de mineur sur les technologies quantiques avec Virginia D'Auria. Il s'agit d'un cours d'introduction ouvert à tous les étudiants, de la licence au doctorat, peu importe leur cursus.

4.3.2 Responsabilités pédagogiques

En 2018, avec plusieurs maîtres de conférences et le professeur F. Mortessagne, nous avons créé un master de physique général qui faisait défaut au sein de l'université Côte d'Azur. Je suis membre du comité de pilotage en charge plus particulièrement des relations internationales du master « Ondes, Atomes & Matière ». En collaboration avec F. Mortessagne, M. Albert, C. Cohen, C. Michel et C. Raufaste, nous avons mis en place et choisi la ligne pédagogique. J'ai précisément contribué à la création d'une séquence d'enseignement bi-hebdomadaire intitulée « group meeting » durant laquelle les étudiants et les chercheurs qui le désirent peuvent échanger librement autour de l'actualité scientifique. C'est un moment de débat et d'échange durant lequel nos « futurs chercheurs » apprennent l'art de communiquer, convaincre leur auditoire et défendre leur idées avec une rigueur scientifique.

4.4 Responsabilités collectives

- De 2012 à 2016, j'ai été membre élu à la commission de la Recherche du Conseil Académique de l'université de Nice (anciennement conseil scientifique).
- De 2010 à 2016, j'ai été membre élu au conseil de laboratoire en charge de représenter l'équipe "Quantum Information with Light & Matter".
- De 2009 à 2013, j'ai été membre de la commission de spécialistes en charge du recrutement des maîtres de conférences au sein de l'université Nice Sophia-Antipolis pour la section 30.

Chapitre 5

Notice bibliographique personnelle

Ma liste de publication est présentée dans l'ordre anti-chronologique. J'ai souligné les noms des doctorants, que j'ai encadrés, et mis en **caractères gras** mon nom pour chaque publication afin d'en faciliter la lecture.

Brevets

WO2013045674A1 : Methode et dispositif de synchronisation de sources d'intrication pour réseau de communication quantique, S. Tanzilli, V. D'Auria, **O. Alibart**, A. Martin et L. Labonté

Publications scientifiques

Les étudiants encadrés sont soulignés

2024

1. **Integrated Photonics for Quantum Communications and Metrology**, L. Labonté, **O. Alibart**, V. D'Auria, F. Doutre, J. Etesse, G. Sauder, A. Martin, É. Picholle and S. Tanzilli, PRX Quantum **5**, 010101

2023

2. **Operational entanglement-based quantum key distribution over 50 km of real-field optical fibres** Y. Pelet, G. Sauder, M. Cohen, L. Labonte, **O. Alibart**, A. Martin and S. Tanzilli, Phys. Rev. Applied **20**, 044006

2022

3. **Satellite-based quantum information networks : use cases, architecture, and road-map**, L. de Forges de Parny, **O. Alibart**, J. Debaud, S. Gressani, A. Lagarrigue, A. Martin, A. Metrat, M. Schiavon, T. Troisi, E. Diamanti, P. Gélard, E. Kerstel, S. Tanzilli and M. Van Den Bossche, Commun Phys **6**, 12

2021

4. **Configurable heralded two-photon Fock-states on a chip**, X. Hua, T. Lunghi, F. Doutre, P. Vergyris, G. Sauder, P. Charlier, L. Labonté, V. D'Auria, A. Martin, S. Tascu, M. P. De Micheli, S. Tanzilli, and **O. Alibart**, Optics Express **29**, 415–424

2020

5. **A universal, plug-and-play synchronisation scheme for practical quantum networks**, V. d'Auria, B. Fedrici, L. Arif Ngah, F. Kaiser, L. Labonté, **O. Alibart** and S. Tanzilli, npj Quantum Information **6**, 21
6. **High-quality photonic entanglement out of a stand-alone silicon chip**, D. Oser, S. Tanzilli, F. Mazeas, C. Alonso-Ramos, X. Le Roux, G. Sauder, X. Hua, **O. Alibart**, L. Vivien, E. Cassan and L. Labonté, npj Quantum Information **6**, 31
7. **Two-photon phase-sensing with single-photon detection**, P. Vergyris, C. Babin, R. Nold, E. Gouzien, H. Herrmann, C. Silberhorn, **O. Alibart**, S. Tanzilli and F. Kaiser, Applied Physics Letters **117**, 024001
8. **Superthermal-light emission and nontrivial photon statistics in small lasers**, T. Wang, D. Aktas, **O. Alibart**, E. Picholle, G. P. Puccioni, S. Tanzilli, and G. L. Lippi, Physical Review A **101**, 063835

2019

9. **Fibre based hyperentanglement generation for dense wavelength division multiplexing**, P. Vergyris, F. Mazeas, E. Gouzien, L. Labonté, **O. Alibart**, S. Tanzilli, and F. Kaiser, Quantum Science and Technology **4**, 045007
10. **Coherency-Broken Bragg Filters : Overcoming On-Chip Rejection Limitations**, D. Oser, F. Mazeas, X. Le Roux, D. Pérez-Galacho, **O. Alibart**, S. Tanzilli, L. Labonté, D. Marris-morini, L. Vivien, E. Cassan and C. Alonso-ramos, Laser & Photonics Reviews **13**, 1800226
11. **Quantum optical frequency up-conversion for polarisation entangled qubits : towards interconnected quantum information devices**, F. Kaiser, P. Vergyris, A. Martin, D. Aktas, M. P. de Micheli, **O. Alibart** and S. Tanzilli, Optics Express **27**, 25603–25610

2018

12. **Broadband integrated beam splitter using spatial adiabatic passage**, T. Lunghi, F. Doutre, A. Rambu, M. Bellec, M. de Micheli, A. Apetrei, **O. Alibart**, N. Belabas, S. Tascu, and S. Tanzilli, Optics Express **26**, 27058–27063
13. **Challenging local realism with human choices**, The BIG Bell Test Collaboration : C. Abellán, A. Acín, A. Alarcón, **O. Alibart**, C. K. Andersen, F. Andreoli, A. Beckert, F. A. Beduini, A. Bendersky, M. Bentivegna, P. Bierhorst, D. Burchardt, A. Cabello, J. Cariñe, S. Carrasco, G. Carvacho, D. Cavalcanti, R. Chaves, J. Cortés-Vega, A. Cuevas, A. Delgado, H. de Riedmatten, C. Eichler, P. Farrera, J. Fuenzalida, M. García-Matos, R. Garthoff, S. Gasparinetti, T. Gerrits, F. Ghafari Jouneghani, S. Glancy, E. S. Gómez, P. González, J.-Y. Guan, J. Handsteiner, J. Heinsoo, G. Heinze, A. Hirschmann, O. Jiménez, F. Kaiser, E. Knill, L. T. Knoll, S. Krinner, P. Kurpiers, M. A. Larotonda, J.-Å. Larsson, A. Lenhard, H. Li, M.-H. Li, G. Lima, B. Liu, Y. Liu, I. H. López Grande, T. Lunghi, X. Ma, O. S. Magaña-Loaiza, P. Magnard, A. Magnoni, M. Martí-Prieto, D. Martínez, P. Mataloni, A. Mattar, M. Mazzer, R. P. Mirin, M.

W. Mitchell, S. Nam, M. Oppliger, J.-W. Pan, R. B. Patel, G. J. Pryde, D. Rauch, K. Redeker, D. Rieländer, M. Ringbauer, T. Roberson, W. Rosenfeld, Y. Salathé, L. Santodonato, G. Sauder, T. Scheidl, C. T. Schmiegelow, F. Sciarrino, A. Seri, L. K. Shalm, S.-C. Shi, S. Slussarenko, M. J. Stevens, S. Tanzilli, F. Toledo, J. Tura, R. Ursin, P. Vergyris, V. B. Verma, T. Walter, A. Wallraff, Z. Wang, H. Weinfurter, M. M. Weston, A. G. White, C. Wu, G. B. Xavier, L. You, X. Yuan, A. Zeilinger, Q. Zhang, W. Zhang, J. Zhong, *Nature* **557**, 212–216

2016

14. **On-chip generation of heralded photon-number states**, P. Vergyris, T. Meany, T. Lunghi, G. Sauder, J. Downes, M. J. Steel, M. J. Withford, **O. Alibart** and S. Tanzilli, *Scientific Reports* **6**, 35975
15. **Quantum photonics at telecom wavelengths based on lithium niobate waveguides**, **O. Alibart**, V. D’Auria, M. De Micheli, F. Doutre, F. Kaiser, L. Labonté, T. Lunghi, E. Picholle and S. Tanzilli, *Journal of Optics* **18**, 104001
16. **Temporal intensity correlation of light scattered by a hot atomic vapor**, A. Dussaux, T. Passerat de Silans, W. Guerin, **O. Alibart**, S. Tanzilli, F. Vakili, and R. Kaiser, *Physical Review A* **93**, 043826

2015

17. **Ultra-fast heralded single photon source based on telecom technology**, L. Arif Ngah, **O. Alibart**, L. Labonté, V. D’Auria and S. Tanzilli, *Laser & Photonics Reviews* **9**, L1–L5.

2014

18. **Polarization entangled photon-pair source based on quantum nonlinear photonics and interferometry**, F. Kaiser, L. Arif Ngah, A. Issautier, T. Delord, D. Aktas, V. D’Auria, M.P. De Micheli, A. Kastberg, L. Labonté, **O. Alibart**, A. Martin and S. Tanzilli, *Optics Communication* **327**, 7–16
19. **Hybrid photonic circuit for multiplexed heralded single photons**, T. Meany, L. Arif Ngah, M. J. Collins, A. S. Clark, R. J. Williams, B. J. Eggleton, M. J. Steel, M. J. Withford, **O. Alibart** and S. Tanzilli, *Laser & Photonics Reviews* **8**, L42–L46

2013

20. **Two-photon interference between disparate sources for quantum networking**, A. R. Mcmillan, L. Labonté, A. S. Clark, B. Bell, A. Martin, **O. Alibart**, W. J. Wadsworth, S. Tanzilli and J. G. Rarity, *Scientific Reports* **3**, 2032
21. **A versatile source of polarisation entangled photons for quantum network applications**, F. Kaiser, A. Issautier, L. Arif Ngah, **O. Alibart**, A. Martin and S. Tanzilli, *Laser Physics Letters* **10**, 045202

2012

22. **Analysis of Elliptically Polarized Maximally Entangled States for Bell Inequality Tests**, A. Martin, J. Smirr, F. Kaiser, E. Diamanti, A. Issautier, **O. Alibart**, R. Frey, I. Zaquine and S. Tanzilli, *Laser Physics* **22**, 1105–1112

23. **A quantum relay chip based on telecommunication integrated optics technology**, A. Martin, **O. Alibart**, D. B. Ostrowsky, M. P. De Micheli and S. Tanzilli, New Journal of Physics **14**, 025002
24. **Non-local geometric phase in two-photon interferometry**, A. Martin, **O. Alibart**, J.-C. Flesch, J. Samuel, S. Sinha, S. Tanzilli and A. Kastberg, Europhysics Letters **97**, 10003
25. **On the genesis and evolution of Integrated Quantum Optics**, S. Tanzilli, A. Martin, F. Kaiser, M. P. De Micheli, **O. Alibart** and D. B. Ostrowsky, Laser & Photonics Reviews **6**, 115-143
26. **Single WDM channel efficient wavelength shifting and/or amplification using counterpropagating optical parametric amplifiers**, **O. Alibart**, M. De Micheli and P. Baldi, Optics Communications **285**, 3886-3889

2011

27. **Intrinsically narrowband pair photon generation in microstructured fibres**, A. Clark, B. Bell, J. Fulconis, M. M. Halder, B. Cemlyn, **O. Alibart**, C. Xiong, W. J. Wadsworth and J. G. Rarity, New Journal of Physics **13**, 065009

2010

28. **Polarization entangled photon-pair source based on a type-II PPLN waveguide emitting at a telecom wavelength**, A. Martin, A. Issautier, H. Herrmann, W. Sohler, D. B. Ostrowsky, **O. Alibart** and S. Tanzilli, New Journal of Physics **12**, 103005
29. **High-visibility two-photon interference at a telecom wavelength using picosecond regime separated sources**, P. Aboussouan, **O. Alibart**, D. B. Ostrowsky, P. Baldi and S. Tanzilli, Physical Review A **81**, 021801

2009

30. **Generation of polarization-entangled photons using type-II doubly periodically poled lithium niobate waveguides**, K. Thyagarajan, J. Lugani, S. Ghosh, K. Sinha, A. Martin, D. B. Ostrowsky, **O. Alibart** and S. Tanzilli, Physical Review A **80**, 052321
31. **Integrated optical source of polarization entangled photons at 1310 nm**, A. Martin, V. Cristofori, P. Aboussouan, H. Herrmann, W. Sohler, D. B. Ostrowsky, **O. Alibart** and S. Tanzilli, Optics Express **17**, 1033-1041

2008

32. **Increased pump acceptance bandwidth in spontaneous parametric down conversion process using Bragg reflection waveguides**, K. Thyagarajan, R. Das, **O. Alibart**, M. de Micheli, D.B. Ostrowsky and S. Tanzilli, Optics Express **16**, 3577-3582

2007

33. **Quantum interference with photon pairs using two micro-structured fibres**, J. Fulconis, **O. Alibart**, W.J. Wadsworth and J.G. Rarity, New Journal of Physics **9**, 276
34. **Nonclassical Interference and Entanglement Generation Using a Photonic Crystal Fiber Pair Photon Source**, J. Fulconis, **O. Alibart**, J.L. O'Brien, W. J. Wadsworth and J. G. Rarity, Physical Review Letters **99**, 120501

2006

- 35. **Photon pair generation using four-wave mixing in a microstructured fibre : theory versus experiment**, **O. Alibart**, J. Fulconis, G. K. L. Wong, S. G. Murdoch, W. J. Wadsworth and J. G. Rarity, *New Journal of Physics* **8**, 67
- 36. **Single-photon Sagnac interferometer**, G. Bertocchi, **O. Alibart**, D.B. Ostrowsky, S. Tanzilli and P. Baldi, *Journal of Physics B : Atomic, Molecular and Optical Physics* **39**, 1011

2005

- 37. **High brightness single mode source of correlated photon pairs using a photonic crystal fiber**, J. Fulconis, **O. Alibart**, W. J. Wadsworth, P. St.J. Russell and J. G. Rarity, *Optics Express* **13**, 7572-7582
- 38. **A photonic quantum information interface**, S. Tanzilli, W. Tittel, M. Halder, **O. Alibart**, P. Baldi, N. Gisin and H. Zbinden, *Nature* **437**, 116-120
- 39. **High performance guided-wave asynchronous heralded single photon source**, **O. Alibart**, S. Tanzilli, D.B. Ostrowsky and P. Baldi, *Optics letters* **30**, 12

2004

- 40. **High-quality asynchronous heralded single-photon source at telecom wavelength**, S. Fasel, **O. Alibart**, S. Tanzilli, P. Baldi, A. Beveratos, N. Gisin and H. Zbinden, *New Journal of Physics* **6**, 163
- 41. **Influence of the photo-depoling parameters on quasi-phase matched second-harmonic generation and optical parametric fluorescence in polymer channel waveguides**, G. Martin, **O. Alibart**, P. Baldi, R. Hierle, D. Josse and J. Zyss, *Journal of Applied Physics* **96**, 7112-7117

Actes de congrès

Up-conversion detectors at 1550 nm for quantum communication : review and recent advances, M. Tournier, **O. Alibart**, F. Doutre, S. Tascu, M. De Micheli, D. B. Ostrowsky, K. Thyagarajan and S. Tanzilli, *EAS Publications Series* **37**, 311-339 (2008)

Dissémination grand public

Distribution quantique de clefs sur un réseau déployé, **O. Alibart**, V. D'Auria, J. Etesse, L. Labonte, A. Martin, E. Picholle, T. Troisi, G. Sauder and S. Tanzilli, *Photoniques* **130**, 35-40 (2025)

Back to basics : Time-tagging single photons, **O. Alibart**, V. D'Auria, G. Sauder, L. Labonte and S. Tanzilli, *Photoniques Special EOS Issue*, 54-60 (2019)

Comprendre : Le comptage de photons corrélés en temps, **O. Alibart**, V. D'Auria, G. Sauder, L. Labonte and S. Tanzilli, *Photoniques* **91**, 38-42 (2018)

Conférences invitées

L'ORATEUR EST SOULIGNÉ

2023

Quantum secured network across the french riviera, O. Alibert, A. Martin, L. Labonté, V. D'Auria and S. Tanzilli. Workshop sur le Temps-Fréquence et les Technologies Quantiques, Nice, France.

Quantum secured network across the french riviera, O. Alibert, A. Martin, L. Labonté, V. D'Auria and S. Tanzilli. 1er workshop de l'IRN franco-canadien sur les sciences et technologies quantiques, VilleJuif, France.

Entanglement-based metropolitan quantum key distribution link, O. Alibert, A. Martin, L. Labonté, V. D'Auria and S. Tanzilli. UCA-Majulab workshop on quantum technologies & photonics, Nice, France.

2018

"Quantum photonics on chip, O. Alibert, V. D'Auria, L. Labonté, T. Lunghi, E. Picholle, S. Tanzilli, X. Hua and P. Vergyris. International symposium on Quantum technologies, Shanghai, Chine.

2017

Introduction to quantum information sciences : a spotlight on quantum photonics technologies, O. Alibert ; V. D'Auria ; F. Dautre ; L. Labonté ; T. Lunghi ; E. Picholle ; and S. Tanzilli. Predoctoral School on Nano & Quantum optics, Les Houches, France.

All-optical synchronization for quantum communication networks, B. Fedrici ; L. A. Ngah ; O. Alibert ; F. Kaiser ; L. Labonté ; V. D'Auria and S. Tanzilli. 19th International Conference on Transparent Optical Networks, Gerone, Espagne.

2016

Quantum optics measurement techniques : From photon statistics to laser coherence characterization, O. Alibert, D. Aktas, T. Wang, G.L. Lippi, E. Picholle and S. Tanzilli, Optical coherence and quantum phenomena in small and single-photon sources, Nice, France

2013

Ultrafast heralded single photon source based on telecommunication technologies, L. A. Ngah ; V. D'Auria ; L. Labonté ; F. Kaiser ; O. Alibert ; S. Tanzilli. 6th Italian Quantum Information Science Conference, Come, Italie.

Photonic entanglement engineering for quantum network applications", F. Kaiser ; A. Issautier ; L. A. Ngah ; O. Alibert ; A. Martin ; S. Tanzilli. 1^{er} Colloque du GDR Atomes Froids, "Atomes froids et ingénierie quantique", Paris, France.

2012

Engineering polarization entanglement at telecom wavelengths, F. Kaiser ; A. Issautier ; L. A. Ngah ; O. Alibert ; A. Martin ; S. Tanzilli. Frontiers in Optics, Rochester, USA.

Integrated nonlinear optics for Quantum Communication, [V. D'Auria](#); S. Tanzilli; O. Alibart; L. Labonté; F. Kaiser; Lutfi-Arif Bin-Ngah. 5th Italian Quantum Information Science Conference, Padoue, Italie.

L'information quantique photonique : le point de vue de l'expérimentateur, [O. Alibart](#); V. D'Auria; L. Labonté; Florent Dautre; M. De Micheli; A. Martin; F. Kaiser; L. A. Ngah; A. Issautier; A. Kastberg; D.B. Ostrowsky; S. Tanzilli. Nice Physics Days, Valbonne Sophia-Antipolis, France.

Engineering polarisation entanglement for quantum network applications, F. Kaiser; A. Issautier; L. A. Ngah; O. Alibart; A. Martin; [S. Tanzilli](#). Quantum 2012, 6th Workshop on Advances in Foundations of Quantum Mechanics and Quantum Information with Atoms and Photons, Turin, Italie.

2011

Quantum communication based on integrated nonlinear optics, [V. D'Auria](#); S. Tanzilli; M. De Micheli; O. Alibart; A. Martin; L. Labonté; Daniel Ostrowsky; F. Kaiser. International Workshop on Quantum Manipulation of Atoms and Photons, Shanghai, Chine.

Narrowband polarization entangled photon-pairs source in the telecom C-band for long distance Quantum networking, [F. Kaiser](#); A. Issautier; O. Alibart; A. Martin; S. Tanzilli. International workshop on quantum manipulation of atoms and photons, Shanghai, Chine.

Enabling quantum communication using integrated nonlinear optics, V. D'Auria; S. Tanzilli; D.B. Ostrowsky; O. Alibart; A. Martin; L. Labonté; F. Kaiser; [M. De Micheli](#). Optical Complex Systems, Marseille, France.

Source de paires de photons intriqués en polar. émis en bande étroite aux longueurs d'ondes des télécoms, [F. Kaiser](#); A. Martin; L. Labonté; V. D'Auria; M. De Micheli; D.B. Ostrowsky; O. Alibart; S. Tanzilli. 12^{ème} Colloque sur les Lasers et l'Optique Quantique, Marseille, France.

Analysis of elliptically polarized, maximally entangled states, [A. Martin](#); Jean-Loup Smir; F. Kaiser; A. Issautier; V. D'Auria; Robert Frey; O. Alibart; Isabelle Zaquine; S. Tanzilli. 20th International Laser Physics Workshop, Sarajevo, Bosnie-Herzégovine.

Narrowband polarization entanglement sources based on integrated optics for telecom quantum applications, F. Kaiser; A. Martin; A. Issautier; L. Labonté; V. D'Auria; M. De Micheli; O. Alibart; [S. Tanzilli](#). IEEE Photonics Society, Summer Topicals on "Entanglement Distribution in quantum communication and Beyond", Montréal, Canada.

Fully fibered polarization entangled photon pair source at a telecom wavelength for long distance Q-networking, [F. Kaiser](#); A. Martin; L. Labonté; V. D'Auria; M. De Micheli; O. Alibart; S. Tanzilli. 13th International Conference on Transparent Optical Networks, Stockholm, Suède.

2010

Polarization entangled photon-pair source based on a type-II PPLN/W emitting at a telecom wavelength, [A. Martin](#); A. Issautier; L. Labonté; Harald Herrmann; W. Sohler; D.B. Ostrowsky; O. Alibart; S. Tanzilli. 12th International Conference on Transparent Optical Networks, Munich, Allemagne.

Guided-wave optics for real quantum relay applications, A. Martin; F. Kaiser; O. Alibart; D.B. Ostrowsky; [S. Tanzilli](#). Quantum 2010 : 5th Workshop on Advances in Foundations of Quantum Mechanics and Quantum Information with atoms and photons, Turin, Italie.

Guided-wave optics for long distance quantum communication, O. Alibart; A. Martin; D.B. Ostrowsky; [S. Tanzilli](#). Heraeus Seminar on quantum communication based on Integrated Optics, Bad Honnef, Allemagne.

Guided-wave optics : an enabling technology for quantum communications, D.B. Ostrowsky;

S. Tanzilli ; O. Alibart ; A. Kastberg ; Pierre Aboussouan ; A. Martin ; F. Kaiser ; A. Issautier ; Pascal Baldi ; M. De Micheli. AMARIS, Paris, France.

2008

Integrated optics for quantum communications toolbox : High visibility two-photon interference experiments, A. Martin, P. Aboussouan, P. Baldi, D.B. Ostrowsky, H. Herrmann, W. Sohler, O. Alibart, and S. Tanzilli. Photonics, Delhi, Inde.

Integrated optics for quantum communications toolbox, O. Alibart, P. Aboussouan, A. Martin, M. Tournier, V. Cristofori, P. Baldi, M.P. De Micheli, D. Ostrowsky, and S. Tanzilli. LAPHYS, Trondheim, Norvège.

2007

Advances in quantum communication using integrated optics, S. Tanzilli, P. Aboussouan, O. Alibart, S. Tascu, P. Baldi, M. De Micheli, D. Ostrowsky, R. Thew, M. Halder, H. Zbinden, and N. Gisin. International Laser Physics Workshop, Leon, Mexique.

Conférences

2022

Photonic integrated structures for room-temperature single-photon emitters in gallium nitride, M. Meunier, M. Zhao, Z. Jiang, S. Chenot, P. De Mierry, M. Leroux, O. Alibart, W. Gao, J. Zuniga Perez, SPIE OPTO 2022, San Francisco, USA.

Operational entanglement-based quantum key distribution in real-field, Y. Pelet, A. Martin, G. Sauder, O. Alibart, L. Labonté, M. Cohen, S. Tanzilli, CLEO, San Jose, USA.

Practical entanglement based metropolitan quantum key distribution link, Y. Pelet, A. Martin, G. Sauder, O. Alibart, L. Labonté, M. Cohen, S. Tanzilli, Quantum 2.0, Boston, USA.

Real field clock synchronization for quantum key distribution using correlated photon pairs, Y. Pelet, G. Sauder, O. Alibart, S. Tanzilli, A.Martin, EQEC, Munich, Germany.

2021

Integrated quantum photonics for quantum applications, X. Hua, T. Lunghi, F. Doutre, G. Sauder, L. Labonté, A. Martin, V. D'Auria, M. De Michel, S. Tanzilli, O. Alibart, Conference on Lasers and Electro-Optics, San José, USA.

2019

Phase-matching insensitive to waveguide parameters variations in $\chi^{(2)}$ -based nonlinear integrated optics devices, M. Neradovskiy, H. Tronche, X. Hua, E. Neradovskaia, M. Richter, U. Kuhl, P. Aschiéri, F. Doutre, T. Lunghi, P. Baldi, O. Alibart, S. Tanzilli, M. P De Micheli, European Conference on Integrated Optics, Amsterdam, Pays-Bas.

Configurable two-photon heralded Fock-States on a chip, X. Hua, T. Lunghi, P. Verkyris, F. Doutre, M. De Micheli, S. Tanzilli and O. Alibart, 26th Central European Workshop on Quantum Optics, Paderborn, Allemagne.

2017

All-optical synchronization for quantum networks, B. Fedrici, L.A. Ngah, F. Kaiser, O. Alibart, L. Labonté, V. D'Auria and S. Tanzilli, Quantum Information and Measurement, Paris, France.

Quantum metrology with two-photon phase-sensitivity and single-photon detection, P. Vergyris, F. Kaiser, N. Montaut, O. Alibart, H. Herrmann, C. Silberhorn, S. Tanzilli, Quantum Information and Measurement, Paris, France.

2016

All-optical synchronization for quantum networks, B. Fedrici, L.A. Ngah, F. Kaiser, O. Alibart, L. Labonté, V. D'Auria and S. Tanzilli, Frontiers in Optics, Rochester, USA.

Configurable heralded two-photon states on a chip, P. Vergyris, T. Meany, T. Lunghi, J.D. Downes, M. Steel, M. Withford, O. Alibart, and S. Tanzilli, Frontiers in Optics, Rochester, USA.

Characterization of the Nonlinear Response of Class B Microlasers in the Threshold Region, D. Aktas, T. Wang, O. Alibart, G.L. Lippi, E. Picholle, S. Tanzilli, Australian Conference on Optical Fibre Technology, Sydney, Australie.

Caractérisation par corrélations quantiques de la région de seuil d'un microlaser de classe B, D. Aktas, T. Wang, O. Alibart, G.L. Lippi, E. Picholle, S. Tanzilli, 36e Journées Nationales d'Optique Guidée (JNOG'36), Bordeaux, France.

Route vers la cohérence de microlasers à semiconducteurs, D. Aktas, T. Wang, O. Alibart, G.L. Lippi, E. Picholle, S. Tanzilli, (COLOQ'15) 15e Colloque sur les Lasers et l'Optique Quantique, Bordeaux, France.

Quantum Coherence in Semiconductor Microlasers, D. Aktas, T. Wang, O. Alibart, G.L. Lippi, E. Picholle, S. Tanzilli, Conference on Lasers and Electro-Optics, San Jose, USA.

2015

On-chip heralded photon-number states generation, P. Vergyris, T. Meany, T. Lunghi, J.D. Downes, M. Steel, M. Withford, O. Alibart, and S. Tanzilli, 1st International Conference for "Young Quantum Information Scientists"(YQIS'15), Paris, France.

Hybrid integrated photonics for on-chip heralded N00N state generation, P. Vergyris, T. Meany, T. Lunghi, G. Sauder, J. Downes, M. J. Steel, M. J. Withford, O. Alibart and S. Tanzilli, International Workshop on Quantum Manipulation of Atoms and Photons (QMAP), Shanghai, Chine.

Ultra-fast heralded single photon source for quantum relay operation, B Fedrici, LA Ngah, O Alibart, L Labonté, V D'Auria, S Tanzilli, Single Photon Workshop 2015 (SPW'15), Genève, Suisse.

2014

Hybrid integration for heralded single photon generation, T. Meany, L.A. Ngah ; M.J. Collins ; A.S. Clark ; R. J. Williams ; B. J. Eggleton ; M. J. Steel ; M. J. Withford ; O. Alibart and S. Tanzilli. 19th OptoElectronics and Communication Conference (OECC) / 39th Australian Conference on Optical Fibre Technology (ACOFT), Melbourne, Australie.

Towards High Repetition Rate Operational Quantum Relay at Telecom Wavelength, L. A. Ngah, V. D'Auria ; L. Labonté ; F. Kaiser ; O. Alibart ; S. Tanzilli. 6th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Graz, Autriche.

Hybrid integration for spatially-multiplexed single-photon generation, T. Meany ; L.A. Ngah ; M.J. Collins ; A.S. Clark ; R. J. Williams ; B. J. Eggleton ; M. J. Steel ; M. J. Withford ; O. Alibart and S. Tanzilli. Conference on Advances in Photonics of Quantum Computing, Memory, and Communication VII, San Francisco, USA.

2013

Indistinguishable ultra-fast photon-pair source for advanced quantum protocols, L. A. Ngah ; V. D'Auria ; O. Alibert ; L. Labonté ; S. Tanzilli. Colloque sur les Lasers et l'Optique Quantique, Villetaneuse, France.

A versatile source of polarization entangled photons for quantum network application, F. Kaiser ; A. Issautier ; L. A. Ngah ; O. Alibert ; A. Martin ; S. Tanzilli. Colloque sur les Lasers et l'Optique Quantique, Villetaneuse, France.

Nuage d'atomes froids de rubidium pour la génération de photons uniques et la téléportation quantique, A. Issautier ; F. Kaiser ; O. Alibert ; A. Kastberg ; S. Tanzilli. Colloque sur les Lasers et l'Optique Quantique, Villetaneuse, France.

2012

Interference of Independent, Telecom Wavelength, Heralded Single Photons from PCF and PPLN Based Sources, R. Mcmillan A. ; L. Labonté ; A. Clark ; B. Bell ; William J. Wadsworth ; O. Alibert ; S. Tanzilli ; John G. Rarity. Photon 12, Durham, Angleterre.

Ultra narrowband telecom polarization entanglement source for future long-distance quantum networks, F. Kaiser ; L. A. Ngah ; A. Issautier ; O. Alibert ; A. Martin ; S. Tanzilli. 11th Conference on Quantum Communication, Measurement, and Computing, Vienne, Autriche.

Interférence quantique à deux photons télécoms issus de sources différentes, R. Mcmillan A. ; S. Clark A. ; L. Labonté ; B. Bell ; O. Alibert ; A. Martin ; William J. Wadsworth ; John G. Rarity ; S. Tanzilli. 32ème Journée Nationale de l'Optique Guidée, Lyon, France.

Polarisation entanglement engineering at telecom wavelength using guided-wave optics, F. Kaiser ; L. A. Ngah ; A. Issautier ; Florent Dautre ; O. Alibert ; A. Martin ; S. Tanzilli, European Conference on Integrated Optics, Barcelone, Espagne.

Polarization entanglement engineering at telecom wavelengths, F. Kaiser ; A. Issautier ; L. A. Ngah ; O. Alibert ; A. Martin ; S. Tanzilli. Quantum Information and Measurements, Berlin, Allemagne.

2011

Narrowband polarization entangled telecom photon pair source, F. Kaiser ; A. Issautier ; O. Alibert ; A. Martin ; S. Tanzilli. 2ème Colloque du GDR "Information Quantique, Fondements & Applications", Paris, France.

Storing polarization entangled qubits at a telecom wavelength in a cold rubidium atomic ensemble via a quantum interface, A. Issautier ; F. Kaiser ; J. Liljekvist ; A. Martin ; O. Alibert ; V. D'Auria ; A. Kastberg ; L. Labonté ; S. Tanzilli. 1er Colloque du GDR "Information Quantique, Fondements & Applications", Nice, France.

Experimental demonstration of a non-local Pancharatnam phase in intensity interferometry, A. Martin ; O. Alibert ; J-C. Flesch ; S. Sinha ; J. Samuel ; S. Tanzilli ; A. Kastberg. 1er Colloque du GDR "Information Quantique, Fondements & Applications", Nice, France.

Ultra narrowband polarisation entangled photon-pair source for long distance quantum networking, F. Kaiser ; A. Martin ; L. Labonté ; V. D'Auria ; M. De Micheli ; O. Alibert ; S. Tanzilli. 1er Colloque du GDR "Information Quantique, Fondements & Applications", Nice, France.

Relais quantique intégré sur niobate de lithium, A. Martin ; D.B. Ostrowsky ; M. De Micheli ; O. Alibert ; S. Tanzilli. 1er Colloque du GDR "Information Quantique, Fondements & Applications", Nice, France.

2010

High-quality polarization entangled photon pair source based on a type-II PPLN waveguide, A. Martin; A. Issautier; F. Kaiser; A. Thomas; H. Herrmann; W. Sohler; M. De Micheli; D.B. Ostrowsky; O. Alibart; S. Tanzilli. 15th European Conference on Integrated Optics, Cambridge, Angleterre.

2008

Two-photon interference using integrated optical sources

O. Alibart, and S. Tanzilli. GDR “Information quantique”, Paris, France.

Advances in quantum communication using integrated optics : first results with a quantum relay chip, S. Tanzilli, S. Tascu, P. Aboussouan, O. Alibart, M.P. De Micheli, D.B. Ostrowsky, and P. Baldi, European Conference on Integrated Optics, Eindhoven, Pays-Bas.

Nonlinear integrated optics for high efficiency photon counters in the near IR, M.P. De Micheli, M. Tournier, P. Baldi, O. Alibart, and S. Tanzilli. Astrophysics Detector Workshop, Nice, France.

Integrated optical source of polarization entangled photons at 1310 nm, A. Martin, V. Cristofori, P. Aboussouan, D.B. Ostrowsky, A. Thomas, H. Herrmann, W. Sohler, O. Alibart, and S. Tanzilli, European Conference on Integrated Optics, Eindhoven, Pays-Bas.

Integrated optics on lithium niobate for quantum communication, S. Tascu, O. Alibart, M. De Micheli, P. Baldi, D.B. Ostrowsky and S. Tanzilli. ICPAM, Iasi, Roumanie.

All-Fibre Source of Heralded Single Photons at 1550 nm, C. Xiong, A.R. McMillan, O. Alibart, J. Fulconis, J.G. Rarity and W. Wadsworth. Conference on Lasers and Electro-Optics, San Jose, USA.

2007

Indiscernabilité, Interférences et Information, O. Alibart and S. Tanzilli. Conférence sur l’Epistémologie en Physique Quantique : entre réalisations expérimentales et problèmes conceptuels, Nice, France.

Quantum optics in micro-structured fibers, J.G. Rarity, J. Fulconis, O. Alibart, J.L. O’Brien, W.J. Wadsworth. Conference on Lasers and Electro-Optics, Baltimore, USA.

2006

Photon-pair generation in the picosecond regime using a non-linear waveguide, P. Aboussouan, O. Alibart, D.B. Ostrowsky, P. Baldi, and S. Tanzilli. Indo-French P2R Workshop, Delhi, Inde.

Quantum interference with photon pairs using two micro-structured fibres and a hint of entanglement..., J. Fulconis, O. Alibart, W. J. Wadsworth and J. G. Rarity. Conference on Lasers and Electro-Optics, Los Angeles, USA.

Micro-structured fibres – A versatile tool for quantum communications, O. Alibart, J. Fulconis, W. J. Wadsworth and J. G. Rarity. European Conference on Optical Communication, Cannes, France.

2005

High-brightness single mode source of correlated photon pairs using a photonic crystal fibre, O. Alibart, J. Fulconis, P. St.J. Russell, W. J. Wadsworth and J. G. Rarity. Single Photon Workshop, Teddington, Angleterre.

High-brightness source of heralded single photons for quantum communications from microstructured fibre, O. Alibart, J. Fulconis, P. St.J. Russell, W. J. Wadsworth and J. G. Rarity.

European Conference on Optical Communication, Glasgow, Angleterre.

Photonic crystal fibre sources of correlated photon pairs, O. Alibart, J. Fulconis, P. St.J. Russell, W. J. Wadsworth and J. G. Rarity. Conference on Lasers and Electro-Optics, Munich, Allemagne.

2004

Highly efficient guided wave heralded-single-photon source at telecom wavelength, O. Alibart, S. Tanzilli, D.B. Ostrowsky, and P. Baldi, Conference on Lasers and Electro-Optics, San Francisco, USA.

Bibliographie

- [1] A. Aspect, “Du débat Bohr-Einstein à l’information quantique : la seconde révolution quantique?”, in *Séances publiques*. Institut de France, Académie des sciences, 2014.
- [2] Dowling Jonathan P. and Milburn Gerard J., “Quantum technology : the second quantum revolution”, *Phil. Trans. R. Soc. A.*, vol. 361, pp. 1655–1674, 2003.
- [3] M. Planck, “On the law of distribution of energy in the normal spectrum”, *Annalen der Physik*, vol. 4, pp. 553, 1901.
- [4] L. de Broglie, “Sur la complémentarité des idées d’individu et de système”, *Dialectica*, vol. 2, no. 3/4, pp. 325–330, 1948.
- [5] A. Einstein, “Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt”, *Annalen der Physik*, vol. 322, pp. 132–148, 1905.
- [6] M. A. Nielsen and I. L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information*, Cambridge University Press, 2000.
- [7] I. M. Georgescu, S. Ashhab, and F. Nori, “Quantum simulation”, *Rev. Mod. Phys.*, vol. 86, pp. 153–185, Mar 2014.
- [8] C. L. Degen, F. Reinhard, and P. Cappellaro, “Quantum sensing”, *Rev. Mod. Phys.*, vol. 89, pp. 035002, Jul 2017.
- [9] V. Giovannetti, S. Lloyd, and L. Maccone, “Advances in quantum metrology”, *Nat. Photonics*, vol. 5, pp. 222–229, 2011.
- [10] N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel, and H. Zbinden, “Quantum cryptography”, *Rev. Mod. Phys.*, vol. 74, pp. 145–195, Mar 2002.
- [11] V. Scarani, H. Bechmann-Pasquinucci, N. J. Cerf, M. Dušek, N. Lütkenhaus, and M. Peev, “The security of practical quantum key distribution”, *Rev. Mod. Phys.*, vol. 81, pp. 1301–1350, Sep 2009.
- [12] Sébastien Tanzilli, *Optique intégrée pour les communications quantiques*, PhD thesis, Université de Nice Sophia-Antipolis, France, 2002.
- [13] Benjamin Schumacher, “Quantum coding”, *Phys. Rev. A*, vol. 51, pp. 2738–2747, Apr 1995.
- [14] A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, “Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?”, *Phys. Rev.*, vol. 47, pp. 777–780, May 1935.
- [15] J. S. Bell, “On the einstein podolsky rosen paradox”, *Physics Physique Fizika*, vol. 1, pp. 195–200, Nov 1964.
- [16] S. Perifel, *Complexité algorithmique*, Ellipses, 2014.
- [17] R. L. Rivest, A. Shamir, and L. Adleman, “A method for obtaining digital signatures and public-key cryptosystems”, *Communications of the ACM*, vol. 21, no. 2, pp. 120–126, 1978.
- [18] Daniel J. Brod, Ernesto F. Galvão, Andrea Crespi, Roberto Osellame, Nicolò Spagnolo, and Fabio Sciarrino, “Photonic implementation of boson sampling : a review”, *Advanced Photonics*, vol. 1, no. 3, pp. 1 – 14, 2019.

- [19] Hui Wang, Jian Qin, Xing Ding, Ming-Cheng Chen, Si Chen, Xiang You, Yu-Ming He, Xiao Jiang, L. You, Z. Wang, C. Schneider, Jelmer J. Renema, Sven Höfling, Chao-Yang Lu, and Jian-Wei Pan, “Boson sampling with 20 input photons and a 60-mode interferometer in a 10^{14} -dimensional hilbert space”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 123, pp. 250503, Dec 2019.
- [20] Bryan T. Gard, Keith R. Motes, Jonathan P. Olson, Peter P. Rohde, and Jonathan P. Dowling, *An Introduction to Boson-Sampling*, chapter Chapter 8, pp. 167–192, World Scientific, 2015.
- [21] D. Deutsch and R. Jozsa, “Rapid solutions of problems by quantum computation”, *Proc. R. Soc. A*, vol. 439, pp. 553–558, 1992.
- [22] P. Shor, “Algorithms for quantum computation : Discrete logarithms and factoring”, *IEEE Symposium on Foundations of Computer Science*, pp. 124–134, 1994.
- [23] L. K. Grover, “A fast quantum mechanical algorithm for database search”, *Proceedings of the Twenty-Eighth Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, pp. 212–219, 1996.
- [24] Edwin Pednault, John A. Gunnels, Giacomo Nannicini, Lior Horesh, Thomas Magerlein, Edgar Solomonik, Erik W. Draeger, Eric T. Holland, and Robert Wisnieff, “Pareto-efficient quantum circuit simulation using tensor contraction deferral”, 2020.
- [25] Youngseok Kim, Andrew Eddins, Sajant Anand, Ken Xuan Wei, Ewout van den Berg, Sami Rosenblatt, Hasan Nayfeh, Yantao Wu, Michael Zaletel, Kristan Temme, and Abhinav Kandala, “Evidence for the utility of quantum computing before fault tolerance”, *Nature*, vol. 618, no. 7965, pp. 500–505, Jun 2023.
- [26] Katrina Barnes, Peter Battaglino, Benjamin J. Bloom, Kayleigh Cassella, Robin Coxe, Nicole Crisosto, Jonathan P. King, Stanimir S. Kondov, Krish Kotru, Stuart C. Larsen, Joseph Lauigan, Brian J. Lester, Mickey McDonald, Eli Megidish, Sandeep Narayanaswami, Ciro Nishiguchi, Remy Notermans, Lucas S. Peng, Albert Ryou, Tsung-Yao Wu, and Michael Yarwood, “Assembly and coherent control of a register of nuclear spin qubits”, *Nature Communications*, vol. 13, no. 1, pp. 2779, May 2022.
- [27] Bert, Fabrice, Mendels, Philippe, Cépas, Olivier, and Lhuillier, Claire, “Quand la frustration rend plus dynamique : les liquides de spins quantiques”, *Reflets phys.*, , no. 37, pp. 4–11, 2013.
- [28] Christian Roos, “Simulating magnetism”, *Nature*, vol. 484, no. 7395, pp. 461–462, Apr 2012.
- [29] Joseph W. Britton, Brian C. Sawyer, Adam C. Keith, C.-C. Joseph Wang, James K. Freericks, Hermann Uys, Michael J. Biercuk, and John J. Bollinger, “Engineered two-dimensional ising interactions in a trapped-ion quantum simulator with hundreds of spins”, *Nature*, vol. 484, no. 7395, pp. 489–492, Apr 2012.
- [30] Markus Reiher, Nathan Wiebe, Krysta M. Svore, Dave Wecker, and Matthias Troyer, “Elucidating reaction mechanisms on quantum computers”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 114, no. 29, pp. 7555–7560, 2017.
- [31] Michel Diamant, Guillaume Lion, Gwendoline Pajot-Métivier, Sébastien Merlet, and Sébastien Déroussi, “The AQC-B Absolute Quantum Gravimeter : A Promising Sensor for Volcano Monitoring”, *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, vol. 27, no. 6, pp. 17–23, August 2024.
- [32] Michel Abgrall, Baptiste Chupin, Luigi De Sarlo, Jocelyne Guéna, Philippe Laurent, Yann Le Coq, Rodolphe Le Targat, Jérôme Lodewyck, Michel Lours, Peter Rosenbusch, Giovanni Daniele Rovera, and Sébastien Bize, “Atomic fountains and optical clocks at SYRTE : Status and perspectives”, *Comptes Rendus. Physique*, vol. 16, no. 5, pp. 461–470, 2015.
- [33] R. Loudon, *The quantum theory of light*, Oxford University Press, 3rd edition, 2000.
- [34] LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, “Observation of gravitational waves from a binary black hole merger”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 116, pp. 061102, Feb 2016.

-
- [35] F. Acernese and the Virgo Collaboration, “Frequency-dependent squeezed vacuum source for the advanced virgo gravitational-wave detector”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 131, pp. 041403, Jul 2023.
 - [36] Jonathan P. Dowling, “Quantum optical metrology – the lowdown on high-n00n states”, *Contemporary Physics*, vol. 49, no. 2, pp. 125–143, 2008.
 - [37] P. Walther, J.-W. Pan, M. Aspelmeyer, R. Ursin, S. Gasparoni, and A. Zeilinger, “De Broglie wavelength of a non-local four-photon state”, *Nature*, vol. 429, pp. 158–161, 2004.
 - [38] M. W. Mitchell, J. S. Lundeen, and A. M. Steinberg, “Super-resolving phase measurements with a multiphoton entangled state”, *Nature*, vol. 429, pp. 161–164, 2004.
 - [39] B. L. Higgins, D. W. Berry, S. D. Bartlett, H. M. Wiseman, and G. J. Pryde, “Entanglement-free Heisenberg-limited phase estimation”, *Nature*, vol. 450, pp. 393–396, 2007.
 - [40] T. Nagata, R. Okamoto, J. L. O’Brien, K. Sasaki, and S. Takeuchi, “Beating the standard quantum limit with four-entangled photons”, *Science*, vol. 316, no. 5825, pp. 726–729, 2007.
 - [41] I. Afek, O. Ambar, and Y. Silberberg, “High-N00N states by mixing quantum and classical light”, *Science*, vol. 328, no. 5980, pp. 879–881, 2010.
 - [42] Y. Israel, S. Rosen, and Y. Silberberg, “Supersensitive polarization microscopy using N00N states of light”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 112, pp. 103604, Mar 2014.
 - [43] W. Heisenberg, “Über den anschaulichen inhalt der quantentheoretischen kinematik und mechanik”, *Zeitschrift für Physik*, vol. 43, no. 3/4, pp. 172–198, 1927.
 - [44] W. K. Wootters and W. H. Zurek, “A single quantum cannot be cloned”, *Nature*, vol. 299, pp. 802–803, 1982.
 - [45] B. Korzh, C. C. W. Lim, R. Houlmann, N. Gisin, M. J. Li, D. Nolan, B. Sanguinetti, R. Thew, and H. Zbinden, “Provably secure and practical quantum key distribution over 307 km of optical fibre”, *Nat. Photonics*, vol. 9, pp. 163–168, 2015.
 - [46] Eleni Diamanti, Hoi-Kwong Lo, Bing Qi, and Zhiliang Yuan, “Practical challenges in quantum key distribution”, *npj Quantum Information*, vol. 2, no. 1, pp. 16025, Nov 2016.
 - [47] S. Pirandola, U. L. Andersen, L. Banchi, M. Berta, D. Bunandar, R. Colbeck, D. Englund, T. Gehring, C. Lupo, C. Ottaviani, J. L. Pereira, M. Razavi, J. Shamsul Shaari, M. Tomamichel, V. C. Usenko, G. Vallone, P. Villoresi, and P. Wallden, “Advances in quantum cryptography”, *Adv. Opt. Photon.*, vol. 12, no. 4, pp. 1012–1236, Dec 2020.
 - [48] D. Stucki, N. Gisin, O. Guinnard, G. Ribordy, and H. Zbinden, “Quantum key distribution over 67 km with a plug and play system”, *New J. Phys.*, vol. 4, pp. 1–8, 2002.
 - [49] Alberto Boaron, Gianluca Boso, Davide Rusca, Cédric Vulliez, Claire Autebert, Misael Caloz, Matthieu Perrenoud, Gaëtan Gras, Félix Bussi eres, Ming-Jun Li, Daniel Nolan, Anthony Martin, and Hugo Zbinden, “Secure quantum key distribution over 421 km of optical fiber”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 121, pp. 190502, Nov 2018.
 - [50] Yu-Ao Chen, Qiang Zhang, Teng-Yun Chen, Wen-Qi Cai, Sheng-Kai Liao, Jun Zhang, Kai Chen, Juan Yin, Ji-Gang Ren, Zhu Chen, Sheng-Long Han, Qing Yu, Ken Liang, Fei Zhou, Xiao Yuan, Mei-Sheng Zhao, Tian-Yin Wang, Xiao Jiang, Liang Zhang, Wei-Yue Liu, Yang Li, Qi Shen, Yuan Cao, Chao-Yang Lu, Rong Shu, Jian-Yu Wang, Li Li, Nai-Le Liu, Feihu Xu, Xiang-Bin Wang, Cheng-Zhi Peng, and Jian-Wei Pan, “An integrated space-to-ground quantum communication network over 4,600 kilometres”, *Nature*, vol. 589, no. 7841, pp. 214–219, Jan 2021.
 - [51] Yang Liu, Wei-Jun Zhang, Cong Jiang, Jiu-Peng Chen, Chi Zhang, Wen-Xin Pan, Di Ma, Hao Dong, Jia-Min Xiong, Cheng-Jun Zhang, Hao Li, Rui-Chun Wang, Jun Wu, Teng-Yun Chen, Lixing You, Xiang-Bin Wang, Qiang Zhang, and Jian-Wei Pan, “Experimental twin-field quantum key distribution over 1000 km fiber distance”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 130, pp. 210801, May 2023.

- [52] P. P. Rohde, J. F. Fitzsimons, and A. Gilchrist, “Quantum walks with encrypted data”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 109, pp. 150501, Oct 2012.
- [53] A. Chailloux and I. Kerenidis, “Optimal quantum strong coin flipping”, *2009 50th Annu. IEEE Symp. Found. Comput. Sci.*, pp. 527–533, 2009, IEEE.
- [54] A. Ambainis, A. Rosmanis, and D. Unruh, “Quantum attacks on classical proof system : The hardness of quantum rewinding”, *IEEE 55th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, pp. 474–483, 2014.
- [55] A. Chailloux, G. Gutoski, and J. Sikora, “Optimal bounds for quantum weak oblivious transfer”, *arXiv :1310.3262*, 2013.
- [56] H. K Lo and H. Chau, “Why quantum bit commitment and ideal quantum coin tossing are impossible”, *Phys. D Nonlinear Phenom.*, vol. 120, no. 1-2, pp. 177–187, 1998.
- [57] Alexander N. Craddock, Anne Lazenby, Gabriel Bello Portmann, Rourke Sekelsky, Mael Flament, and Mehdi Namazi, “Automated distribution of polarization-entangled photons using deployed new york city fibers”, *PRX Quantum*, vol. 5, pp. 030330, Aug 2024.
- [58] Siddarth Koduru Joshi, Djeylan Aktas, Sören Wengerowsky, Martin Lončarić, Sebastian Philipp Neumann, Bo Liu, Thomas Scheidl, Guillermo Currás Lorenzo, Željko Samec, Laurent Kling, Alex Qiu, Mohsen Razavi, Mario Stipčević, John G. Rarity, and Rupert Ursin, “A trusted node-free eight-user metropolitan quantum communication network”, *Science Advances*, vol. 6, no. 36, pp. eaba0959, 2020.
- [59] S. Tanzilli, A. Martin, F. Kaiser, M.P. De Micheli, O. Alibart, and D.B. Ostrowsky, “On the genesis and evolution of integrated quantum optics”, *Laser & Photonics Reviews*, vol. 6, no. 1, pp. 115–143, 2012.
- [60] Joshua W. Silverstone, Damien Bonneau, Jeremy L. O’Brien, and Mark G. Thompson, “Silicon quantum photonics”, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 22, no. 6, pp. 390–402, 2016.
- [61] F. Baboux, G. Moody, and S. Ducci, “Nonlinear integrated quantum photonics with algaas”, *Optica*, vol. 10, no. 7, pp. 917–931, Jul 2023.
- [62] Xiang Guo, Chang-ling Zou, Carsten Schuck, Hojoong Jung, Risheng Cheng, and Hong X Tang, “Parametric down-conversion photon-pair source on a nanophotonic chip”, *Light : Science & Applications*, vol. 6, no. 5, pp. e16249–e16249, 2017.
- [63] Hong Zeng, Zhao-Qin He, Yun-Ru Fan, Yue Luo, Chen Lyu, Jin-Peng Wu, Yun-Bo Li, Sheng Liu, Dong Wang, De-Chao Zhang, Juan-Juan Zeng, Guang-Wei Deng, You Wang, Hai-Zhi Song, Zhen Wang, Li-Xing You, Kai Guo, Chang-Zheng Sun, Yi Luo, Guang-Can Guo, and Qiang Zhou, “Quantum light generation based on gan microring toward fully on-chip source”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 132, pp. 133603, Mar 2024.
- [64] Yoann Pelet, Grégory Sauder, Mathis Cohen, Laurent Labonté, Olivier Alibart, Anthony Martin, and Sébastien Tanzilli, “Operational entanglement-based quantum key distribution over 50 km of field-deployed optical fibers”, *Phys. Rev. Appl.*, vol. 20, pp. 044006, Oct 2023.
- [65] Junjie Wu, Lixing You, Sijing Chen, Hao Li, Yuhao He, Chaolin Lv, Zhen Wang, and Xiaoming Xie, “Improving the timing jitter of a superconducting nanowire single-photon detection system”, *Appl. Opt.*, vol. 56, no. 8, pp. 2195–2200, Mar 2017.
- [66] Sijing Chen, Dengkuan Liu, Wenxing Zhang, Lixing You, Yuhao He, Weijun Zhang, Xiaoyan Yang, Guang Wu, Min Ren, Heping Zeng, Zhen Wang, Xiaoming Xie, and Mianheng Jiang, “Time-of-flight laser ranging and imaging at 1550nm using low-jitter superconducting nanowire single-photon detection system”, *Appl. Opt.*, vol. 52, no. 14, pp. 3241–3245, May 2013.

-
- [67] Tobias Schmitt-Manderbach, Henning Weier, Martin Fürst, Rupert Ursin, Felix Tiefenbacher, Thomas Scheidl, Josep Perdignes, Zoran Sodnik, Christian Kurtsiefer, John G. Rarity, Anton Zeilinger, and Harald Weinfurter, “Experimental demonstration of free-space decoy-state quantum key distribution over 144 km”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 98, pp. 010504, Jan 2007.
 - [68] Domenico Ribezzo, Mujtaba Zahidy, Ilaria Vagniluca, Nicola Biagi, Saverio Francesconi, Tommaso Occhipinti, Leif K Oxenløwe, Martin Lončarić, Ivan Cvitić, Mario Stipčević, et al., “Deploying an inter-european quantum network”, *Advanced Quantum Technologies*, vol. 6, no. 2, pp. 2200061, 2023.
 - [69] Dounan Du, Leonardo Castillo-Veneros, Guodong Cui, Dillion Cottrill, Julián Martínez-Rincón, Paul Stankus, Dimitrios Katramatos, and Eden Figueroa, “A quantum-capable internet testbed connecting room temperature quantum memories”, in *Quantum 2.0 Conference and Exhibition*. 2022, p. QM2B.3, Optica Publishing Group.
 - [70] JF Dynes, Adrian Wonfor, WW-S Tam, AW Sharpe, R Takahashi, M Lucamarini, A Plews, ZL Yuan, AR Dixon, J Cho, et al., “Cambridge quantum network”, *npj Quantum Information*, vol. 5, no. 1, pp. 1–8, 2019.
 - [71] Sheng-Kai Liao, Wen-Qi Cai, Johannes Handsteiner, Bo Liu, Juan Yin, Liang Zhang, Dominik Rauch, Matthias Fink, Ji-Gang Ren, Wei-Yue Liu, et al., “Satellite-relayed intercontinental quantum network”, *Physical review letters*, vol. 120, no. 3, pp. 030501, 2018.
 - [72] Hoi-Kwong Lo, Xiongfeng Ma, and Kai Chen, “Decoy state quantum key distribution”, *Physical review letters*, vol. 94, no. 23, pp. 230504, 2005.
 - [73] Joseph C. Chapman, Charles C.W. Lim, and Paul G. Kwiat, “Hyperentangled time-bin and polarization quantum key distribution”, *Phys. Rev. Appl.*, vol. 18, pp. 044027, Oct 2022.
 - [74] Yu-Ao Chen, Qiang Zhang, Teng-Yun Chen, Wen-Qi Cai, Sheng-Kai Liao, Jun Zhang, Kai Chen, Juan Yin, Ji-Gang Ren, Zhu Chen, et al., “An integrated space-to-ground quantum communication network over 4,600 kilometres”, *Nature*, vol. 589, no. 7841, pp. 214–219, 2021.
 - [75] Marco Lucamarini, Zhiliang L Yuan, James F Dynes, and Andrew J Shields, “Overcoming the rate–distance limit of quantum key distribution without quantum repeaters”, *Nature*, vol. 557, no. 7705, pp. 400–403, 2018.
 - [76] Yang Liu, Wei-Jun Zhang, Cong Jiang, Jiu-Peng Chen, Chi Zhang, Wen-Xin Pan, Di Ma, Hao Dong, Jia-Min Xiong, Cheng-Jun Zhang, et al., “Experimental twin-field quantum key distribution over 1000 km fiber distance”, *Physical Review Letters*, vol. 130, no. 21, pp. 210801, 2023.
 - [77] Chao-Yang Lu, Yuan Cao, Cheng-Zhi Peng, and Jian-Wei Pan, “Micius quantum experiments in space”, *Rev. Mod. Phys.*, vol. 94, pp. 035001, Jul 2022.
 - [78] R Ursin, F Tiefenbacher, T Schmitt-Manderbach, H Weier, T Scheidl, M Lindenthal, B Blauensteiner, T Jennewein, J Perdignes, P Trojek, B Ömer, M Fürst, M Meyenburg, J Rarity, Z Sodnik, C Barbieri, H Weinfurter, and A Zeilinger, “Entanglement-based quantum communication over 144 km”, *Nature Physics*, vol. 3, no. 7, pp. 481–486, July 2007.
 - [79] Sebastian Philipp Neumann, Alexander Buchner, Lukas Bulla, Martin Bohmann, and Rupert Ursin, “Continuous entanglement distribution over a transnational 248 km fiber link”, *Nature Communications*, vol. 13, no. 1, pp. 6134, 2022.
 - [80] Sören Wengerowsky, Siddarth Koduru Joshi, Fabian Steinlechner, Julien R Zichi, Sergiy M Dobrovolskiy, Rene Van der Molen, Johannes WN Los, Val Zwiller, Marijn AM Versteegh, Alberto Mura, et al., “Entanglement distribution over a 96-km-long submarine optical fiber”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 116, no. 14, pp. 6684–6688, 2019.
 - [81] Domenico Ribezzo, Mujtaba Zahidy, Gianmarco Lemmi, Antoine Petitjean, Claudia De Lazzari, Ilaria Vagniluca, Enrico Conca, Alberto Tosi, Tommaso Occhipinti, Leif K. Oxenløwe, André Xuereb, Davide Bacco, and Alessandro Zavatta, “Quantum key distribution over 100 km of

- underwater optical fiber assisted by a fast-gated single-photon detector”, *Phys. Rev. Appl.*, vol. 20, pp. 044052, Oct 2023.
- [82] Martino Travagnin, Adam Lewis, et al., “Quantum key distribution in-field implementations”, *Publications Office of the European Union*, 2019.
- [83] D. P. Nadlinger, P. Drmota, B. C. Nichol, G. Araneda, D. Main, R. Srinivas, D. M. Lucas, C. J. Ballance, K. Ivanov, E. Y.-Z. Tan, P. Sekatski, R. L. Urbanke, R. Renner, N. Sangouard, and J.-D. Bancal, “Experimental quantum key distribution certified by bell’s theorem”, *Nature*, vol. 607, no. 7920, pp. 682–686, 2022.
- [84] Max Meunier, John J. H. Eng, Zhao Mu, Sebastien Chenot, Virginie Brändli, Philippe de Mierry, Weibo Gao, and Jesús Zúñiga-Pérez, “Telecom single-photon emitters in gan operating at room temperature : embedment into bullseye antennas”, *Nanophotonics*, vol. 12, no. 8, pp. 1405–1419, 2023.
- [85] Mujtaba Zahidy, Mikkel T. Mikkelsen, Ronny Müller, Beatrice Da Lio, Martin Krehbiel, Ying Wang, Nikolai Bart, Andreas D. Wieck, Arne Ludwig, Michael Galili, Søren Forchhammer, Peter Lodahl, Leif K. Oxenløwe, Davide Bacco, and Leonardo Midolo, “Quantum key distribution using deterministic single-photon sources over a field-installed fibre link”, *npj Quantum Information*, vol. 10, no. 1, pp. 2, Jan 2024.
- [86] Siddarth Koduru Joshi, Djeylan Aktas, Sören Wengerowsky, Martin Lončarić, Sebastian Philipp Neumann, Bo Liu, Thomas Scheidl, Guillermo Currás Lorenzo, Željko Samec, Laurent Kling, et al., “A trusted node-free eight-user metropolitan quantum communication network”, *Science advances*, vol. 6, no. 36, pp. eaba0959, 2020.
- [87] Yoann Pelet, Ittoop Vergheese Puthoor, Natarajan Venkatachalam, Sören Wengerowsky, Martin Lončarić, Sebastian Philipp Neumann, Bo Liu, Željko Samec, Mario Stipčević, Rupert Ursin, et al., “Unconditionally secure digital signatures implemented in an eight-user quantum network”, *New Journal of Physics*, vol. 24, no. 9, pp. 093038, 2022.
- [88] Yang Wang, Alexander N. Craddock, Jaeda M. Mendoza, Rourke Sekelsky, Mael Flament, and Mehdi Namazi, “High-fidelity entanglement between a telecom photon and a room-temperature quantum memory”, 2025.
- [89] Yoann Piétri, Luis Trigo Vidarte, Matteo Schiavon, Laurent Vivien, Philippe Grangier, Amine Rhouni, and Eleni Diamanti, “Experimental demonstration of continuous-variable quantum key distribution with a silicon photonics integrated receiver”, *Optica Quantum*, vol. 2, no. 6, pp. 428–437, Dec 2024.
- [90] Yoann Piétri, Matteo Schiavon, Valentina Marulanda Acosta, Baptiste Gouraud, Luis Trigo Vidarte, Philippe Grangier, Amine Rhouni, and Eleni Diamanti, “QOSST : A Highly-Modular Open Source Platform for Experimental Continuous-Variable Quantum Key Distribution”, *Quantum*, vol. 8, pp. 1575, December 2024.
- [91] Luca Calderaro, Andrea Stanco, Costantino Agnesi, Marco Avesani, Daniele Dequal, Paolo Villoresi, and Giuseppe Vallone, “Fast and simple qubit-based synchronization for quantum key distribution”, *Phys. Rev. Appl.*, vol. 13, pp. 054041, May 2020.
- [92] A V Miller, “A fast and efficient algorithm for time synchronization in satellite quantum key distribution”, *Journal of Physics : Conference Series*, vol. 2701, no. 1, pp. 012017, feb 2024.
- [93] Chaoze Wang, Yang Li, Wenqi Cai, Meng Yang, Weiyue Liu, Shengkai Liao, and Chengzhi Peng, “Robust aperiodic synchronous scheme for satellite-to-ground quantum key distribution”, *Appl. Opt.*, vol. 60, no. 16, pp. 4787–4792, Jun 2021.
- [94] Hui Dai, Qi Shen, Chao-Ze Wang, Shuang-Lin Li, Wei-Yue Liu, Wen-Qi Cai, Sheng-Kai Liao, Ji-Gang Ren, Juan Yin, Yu-Ao Chen, Qiang Zhang, Feihu Xu, Cheng-Zhi Peng, and Jian-Wei Pan, “Towards satellite-based quantum-secure time transfer”, *Nature Physics*, vol. 16, no. 8, pp. 848–852, Aug 2020.

-
- [95] Ivan A. Burenkov, Alexandra Semionov, Hala, Thomas Gerrits, Anouar Rahmouni, DJ Anand, Ya-Shian Li-Baboud, Oliver Slattery, Abdella Battou, and Sergey V. Polyakov, “Synchronization and coexistence in quantum networks”, *Opt. Express*, vol. 31, no. 7, pp. 11431–11446, Mar 2023.
 - [96] Jordan M. Thomas, Fei I. Yeh, Jim Hao Chen, Joe J. Mambretti, Scott J. Kohlert, Gregory S. Kanter, and Prem Kumar, “Quantum teleportation coexisting with classical communications in optical fiber”, *Optica*, vol. 11, no. 12, pp. 1700–1707, Dec 2024.
 - [97] K. A. Patel, J. F. Dynes, I. Choi, A. W. Sharpe, A. R. Dixon, Z. L. Yuan, R. V. Pentty, and A. J. Shields, “Coexistence of high-bit-rate quantum key distribution and data on optical fiber”, *Phys. Rev. X*, vol. 2, pp. 041010, Nov 2012.
 - [98] S. Tanzilli, W. Tittel, H. De Riedmatten, H. Zbinden, P. Baldi, M. DeMicheli, D.B. Ostrowsky, and N. Gisin, “PPLN waveguide for quantum communication”, *The European Physical Journal D - Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics*, vol. 18, no. 2, pp. 155–160, 2002.
 - [99] P J Mosley, J S Lundeen, B J Smith, and I A Walmsley, “Conditional preparation of single photons using parametric downconversion : a recipe for purity”, *New Journal of Physics*, vol. 10, no. 9, pp. 093011, sep 2008.
 - [100] F Kaiser, A Issautier, L A Ngah, O Dănilă, H Herrmann, W Sohler, A Martin, and S Tanzilli, “High-quality polarization entanglement state preparation and manipulation in standard telecommunication channels”, *New Journal of Physics*, vol. 14, no. 8, pp. 085015, aug 2012.
 - [101] Paul G. Kwiat, Klaus Mattle, Harald Weinfurter, Anton Zeilinger, Alexander V. Sergienko, and Yanhua Shih, “New high-intensity source of polarization-entangled photon pairs”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 75, pp. 4337–4341, Dec 1995.
 - [102] Paul G. Kwiat, Edo Waks, Andrew G. White, Ian Appelbaum, and Philippe H. Eberhard, “Ultrabright source of polarization-entangled photons”, *Phys. Rev. A*, vol. 60, pp. R773–R776, Aug 1999.
 - [103] Xiao-Hui Bao, Yong Qian, Jian Yang, Han Zhang, Zeng-Bing Chen, Tao Yang, and Jian-Wei Pan, “Generation of narrow-band polarization-entangled photon pairs for atomic quantum memories”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 101, pp. 190501, Nov 2008.
 - [104] Long Tian, Shujing Li, Haoxiang Yuan, and Hai Wang, “Generation of narrow-band polarization-entangled photon pairs at a rubidium d1 line”, *Journal of the Physical Society of Japan*, vol. 85, no. 12, pp. 124403, 2016.
 - [105] Kazuya Niizeki, Kohei Ikeda, Mingyang Zheng, Xiuping Xie, Kotaro Okamura, Nobuyuki Takei, Naoto Namekata, Shuichiro Inoue, Hideo Kosaka, and Tomoyuki Horikiri, “Ultrabright narrow-band telecom two-photon source for long-distance quantum communication”, *Applied Physics Express*, vol. 11, no. 4, pp. 042801, mar 2018.
 - [106] Markus Rambach, Aleksandrina Nikolova, Till J. Weinhold, and Andrew G. White, “Sub-megahertz linewidth single photon source”, *APL Photonics*, vol. 1, no. 9, pp. 096101, 11 2016.
 - [107] Jeremy C. Adcock, Caterina Vigliar, Raffaele Santagati, Joshua W. Silverstone, and Mark G. Thompson, “Programmable four-photon graph states on a silicon chip”, *Nature Communications*, vol. 10, no. 1, pp. 3528, 2019.
 - [108] J. W. Silverstone, D. Bonneau, K. Ohira, N. Suzuki, H. Yoshida, N. Iizuka, M. Ezaki, C. M. Natarajan, M. G. Tanner, R. H. Hadfield, V. Zwiller, G. D. Marshall, J. G. Rarity, J. L. O’Brien, and M. G. Thompson, “On-chip quantum interference between silicon photon-pair sources”, *Nature Photonics*, vol. 8, no. 2, pp. 104–108, 2014.
 - [109] Joshua W. Silverstone, Damien Bonneau, Jeremy L. O’Brien, and Mark G. Thompson, “Silicon quantum photonics”, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 22, no. 6, pp. 390–402, 2016.

- [110] C. K. Hong, Z. Y. Ou, and L. Mandel, “Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 59, pp. 2044–2046, Nov 1987.
- [111] Peter J. Mosley, *Generation of heralded single photons in pure quantum states*, PhD thesis, Oxford University, 2007.
- [112] Adrian J. Menssen, Alex E. Jones, Benjamin J. Metcalf, Malte C. Tichy, Stefanie Barz, W. Steven Kolthammer, and Ian A. Walmsley, “Distinguishability and many-particle interference”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 118, pp. 153603, Apr 2017.
- [113] T. B. Pittman, D. V. Strekalov, A. Migdall, M. H. Rubin, A. V. Sergienko, and Y. H. Shih, “Can two-photon interference be considered the interference of two photons?”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 77, pp. 1917–1920, Sep 1996.
- [114] M. Halder, A. Beveratos, N. Gisin, V. Scarani, C. Simon, and H. Zbinden, “Entangling independent photons by time measurement”, *Nat. Phys.*, vol. 3, pp. 692–695, 2007.
- [115] Tao Yang, Qiang Zhang, Teng-Yun Chen, Shan Lu, Juan Yin, Jian-Wei Pan, Zhi-Yi Wei, Jing-Rong Tian, and Jie Zhang, “Experimental synchronization of independent entangled photon sources”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 96, pp. 110501, Mar 2006.
- [116] Rainer Kaltenbaek, Bibiane Blauensteiner, Marek Żukowski, Markus Aspelmeyer, and Anton Zeilinger, “Experimental interference of independent photons”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 96, pp. 240502, Jun 2006.
- [117] R. Kaltenbaek, R. Prevedel, M. Aspelmeyer, and A. Zeilinger, “High-fidelity entanglement swapping with fully independent sources”, *Phys. Rev. A*, vol. 79, pp. 040302, Apr 2009.
- [118] Yisheng Lei, Faezeh Kimiaee Asadi, Tian Zhong, Alex Kuzmich, Christoph Simon, and Mahdi Hosseini, “Quantum optical memory for entanglement distribution”, *Optica*, vol. 10, no. 11, pp. 1511–1528, Nov 2023.
- [119] Nijil Lal, Ivan A. Burenkov, Ya-Shian Li-Baboud, M. V. Jabir, Paulina S. Kuo, Thomas Gerrits, Oliver Slattery, and Sergey V. Polyakov, “Synchronized source of indistinguishable photons for quantum networks”, *Opt. Express*, vol. 32, no. 10, pp. 18257–18267, May 2024.
- [120] R. Valivarthi, M. G. Puigibert, Q. Zhou, G. H. Aguilar, V. B. Verma, F. Marsili, M. D. Shaw, S. W. Nam, D. Oblak, and W. Tittel, “Quantum teleportation across a metropolitan fibre network”, *Nat. Photonics*, vol. 10, pp. 676–680, 2016.
- [121] Q. C. Sun, Y. L. Mao, S. J. Chen, W. Zhang, Y. F. Jiang, Y. B. Zhang, W. J. Zhang, S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, X. Jiang, T. Y. Chen, L. X. You, H.X. F. Chen, Z. Wang, J. Y. Fan, Q. Zhang, and J. W. Pan, “Quantum teleportation with independent sources and prior entanglement distribution over a network”, *Nat. Photonics*, vol. 10, pp. 671–675, 2016.
- [122] Alberto Politi, Jonathan C. F. Matthews, and Jeremy L. O’Brien, “Shor’s quantum factoring algorithm on a photonic chip”, *Science*, vol. 325, no. 5945, pp. 1221–1221, 2009.
- [123] J O Owens, M A Broome, D N Biggerstaff, M E Goggin, A Fedrizzi, T Linjordet, M Ams, G D Marshall, J Twamley, M J Withford, and A G White, “Two-photon quantum walks in an elliptical direct-write waveguide array”, *New Journal of Physics*, vol. 13, no. 7, pp. 075003, jul 2011.
- [124] Thomas Meany, Markus Gräfe, René Heilmann, Armando Perez-Leija, Simon Gross, Michael J. Steel, Michael J. Withford, and Alexander Szameit, “Laser written circuits for quantum photonics”, *Laser & Photonics Reviews*, vol. 9, no. 4, pp. 363–384, 2015.
- [125] Cagin Ekici, Elizaveta Semenova, Davide Bacco, and Yunhong Ding, *Silicon Quantum Photonics - Platform and Applications*, chapter 22, pp. 599–650, John Wiley & Sons, Ltd, 2023.
- [126] Zhenda Xie and Shining Zhu, “LiNbO3 crystals : from bulk to film”, *Advanced Photonics*, vol. 4, no. 3, pp. 030502, 2022.

- [127] Patrik I. Sund, Emma Lomonte, Stefano Paesani, Ying Wang, Jacques Carolan, Nikolai Bart, Andreas D. Wieck, Arne Ludwig, Leonardo Midolo, Wolfram H. P. Pernice, Peter Lodahl, and Francesco Lenzini, “High-speed thin-film lithium niobate quantum processor driven by a solid-state quantum emitter”, *Science Advances*, vol. 9, no. 19, pp. eadg7268, 2023.
- [128] Cheng Wang, Mian Zhang, Xi Chen, Maxime Bertrand, Amirhassan Shams-Ansari, Sethumadhavan Chandrasekhar, Peter Winzer, and Marko Lončar, “Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages”, *Nature*, vol. 562, no. 7725, pp. 101–104, 2018.
- [129] H. Jin, F. M. Liu, P. Xu, J. L. Xia, M. L. Zhong, Y. Yuan, J. W. Zhou, Y. X. Gong, W. Wang, and S. N. Zhu, “On-chip generation and manipulation of entangled photons based on reconfigurable lithium-niobate waveguide circuits”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 113, pp. 103601, Sep 2014.
- [130] L. Bergeron, C. Chartrand, A. T. K. Kurkjian, K. J. Morse, H. Riemann, N. V. Abrosimov, P. Becker, H.-J. Pohl, M. L. W. Thewalt, and S. Simmons, “Silicon-integrated telecommunications photon-spin interface”, *PRX Quantum*, vol. 1, pp. 020301, Oct 2020.
- [131] Sophie Hermans, Anna Tchebotareva, Peter Humphreys, Dirk Voigt, Peter Harmsma, Lun Cheng, Ad Verlaan, Niels Dijkhuizen, Wim de Jong, Anaïs Dréau, and Ronald Hanson, “Entanglement between nitrogen-vacancy spin in diamond and telecom frequency photon”, in *Quantum Information and Measurement (QIM) V : Quantum Technologies*. 2019, p. S2A.5, Optica Publishing Group.
- [132] Christopher L. Morrison, Roberto G. Pousa, Francesco Graffitti, Zhe Xian Koong, Peter Barrow, Nick G. Stoltz, Dirk Bouwmeester, John Jeffers, Daniel K. L. Oi, Brian D. Gerardot, and Alessandro Fedrizzi, “Single-emitter quantum key distribution over 175 km of fibre with optimised finite key rates”, *Nature Communications*, vol. 14, no. 1, pp. 3573, Jun 2023.
- [133] Anaïs Dréau, Anna Tchebotareva, Aboubakr El Mahdaoui, Cristian Bonato, and Ronald Hanson, “Quantum frequency conversion of single photons from a nitrogen-vacancy center in diamond to telecommunication wavelengths”, *Phys. Rev. Appl.*, vol. 9, pp. 064031, Jun 2018.
- [134] J.S. Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, 2004.
- [135] J. D. Franson, “Bell inequality for position and time”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 62, pp. 2205–2208, May 1989.
- [136] Byoung S. Ham, “The origin of correlation fringe in franson-type experiments”, 2020.
- [137] D. V. Strekalov, T. B. Pittman, A. V. Sergienko, Y. H. Shih, and P. G. Kwiat, “Postselection-free energy-time entanglement”, *Phys. Rev. A*, vol. 54, pp. R1–R4, Jul 1996.
- [138] P Vergyris, F Kaiser, E Gouzien, G Sauder, T Lunghi, and S Tanzilli, “Fully guided-wave photon pair source for quantum applications”, *Quantum Science and Technology*, vol. 2, no. 2, pp. 024007, may 2017.
- [139] D. Aktas, B. Fedrici, F. Kaiser, T. Lunghi, L. Labonté, and S. Tanzilli, “Entanglement distribution over 150 km in wavelength division multiplexed channels for quantum cryptography”, *Laser and Photon. Rev.*, vol. 10, no. 3, pp. 451–457, 2016.
- [140] T. Guerreiro, A. Martin, B. Sanguinetti, N. Bruno, H. Zbinden, and R. T. Thew, “High efficiency coupling of photon pairs in practice”, *Opt. Express*, vol. 21, no. 23, pp. 27641–27651, Nov 2013.
- [141] N. Somaschi, V. Giesz, L. De Santis, J. C. Lored, M. P. Almeida, G. Hornecker, S. L. Portalupi, T. Grange, C. Anton, J. Demory, C. Gomez, I. Sagnes, N. D. Lanzillotti-Kimura, A. Lemaître, A. Auffeves, A. G. White, L. Lanco, and P. Senellart, “Near-optimal single-photon sources in the solid state”, *Nat. Photonics*, vol. 10, pp. 340–345, 2016.
- [142] Nico Margaria, Florian Pastier, Thinhinane Bennour, Marie Billard, Edouard Ivanov, William Hease, Petr Stepanov, Albert F. Adiyatullin, Raksha Singla, Mathias Pont, Maxime Descampeaux,

- Alice Bernard, Anton Pishchagin, Martina Morassi, Aristide Lemaître, Thomas Volz, Valérian Giesz, Niccolo Somaschi, Nicolas Maring, Sébastien Boissier, Thi Huong Au, and Pascale Senellart, “Efficient fiber-pigtailed source of indistinguishable single photons”, 2024.
- [143] A. Beveratos, S. Kühn, R. Brouri, T. Gacoin, J.-P. Poizat, and P. Grangier, “Room temperature stable single-photon source”, *The European Physical Journal D - Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics*, vol. 18, no. 2, pp. 191–196, Feb 2002.
- [144] S. Bounouar, M. Elouneg-Jamroz, M. den Hertog, C. Morchutt, E. Bellet-Amalric, R. André, C. Bougerol, Y. Genuist, J.-Ph. Poizat, S. Tatarenko, and K. Kheng, “Ultrafast room temperature single-photon source from nanowire-quantum dots”, *Nano Letters*, vol. 12, no. 6, pp. 2977–2981, Jun 2012.
- [145] Mark J. Holmes, Kihyun Choi, Satoshi Kako, Munetaka Arita, and Yasuhiko Arakawa, “Room-temperature triggered single photon emission from a iii-nitride site-controlled nanowire quantum dot”, *Nano Letters*, vol. 14, no. 2, pp. 982–986, Feb 2014.
- [146] Karsten B. Dideriksen, Rebecca Schmieg, Michael Zugenmaier, and Eugene S. Polzik, “Room-temperature single-photon source with near-millisecond built-in memory”, *Nature Communications*, vol. 12, no. 1, pp. 3699, Jun 2021.
- [147] Max Meunier, *Étude d’une nouvelle source de photons uniques, travaillant jusqu’à température ambiante, émettant aux longueurs d’onde télécom et compatibles avec la filière photonique silicium*, PhD thesis, Université Côte d’Azur, 2023, Thèse de doctorat dirigée par Zúñiga-Pérez, Jésus Physique Université Côte d’Azur 2023.
- [148] Thomas Prévost, Bruno Martin, and Olivier Alibert, “An ETSI GS QKD compliant TLS implementation”, *Cryptology ePrint Archive*, Paper 2025/389, 2025.
- [149] Thomas Prévost, Olivier Alibert, Anne Marin, and Marc Kaplan, “MUTLISS : a protocol for long-term secure distributed storage over multiple remote QKD networks”, *Cryptology ePrint Archive*, Paper 2024/1915, 2024.