

Sources de photons jumeaux : des débats sur l'intrication aux nouvelles technologies quantiques

Sara DUCCI

Laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques, Université Paris Diderot

sara.ducci@univ-paris-diderot.fr

L'intrication est une des propriétés les plus fascinantes de la mécanique quantique ; quand deux particules sont intriquées, la mesure des propriétés de l'une permet de connaître instantanément les propriétés de sa jumelle, quelle que soit la distance les séparant. Après avoir été démontrée expérimentalement sur différents systèmes, l'intrication est aujourd'hui au cœur de plusieurs domaines de recherche, comme les communications, le calcul et la métrologie. En parallèle aux recherches fondamentales sur des expériences de laboratoire très complexes, on assiste à un véritable essor de technologies quantiques dans l'objectif d'intégrer plusieurs composants quantiques sur une même puce. Dans cet article, nous illustrons l'évolution des sources de paires de photons intriqués, des expériences pionnières sur les cascades atomiques aux derniers dispositifs ultracompacts en matériaux semiconducteurs.

Des débats sur l'étrange de la mécanique quantique au théorème de Bell

L'intrication est un concept troublant qui a soulevé des débats acharnés entre les fondateurs de la mécanique quantique ; l'existence de paires de particules intriquées était tellement contre-intuitive que Einstein, Podolski et Rosen en 1935 émirent l'hypothèse que le formalisme quantique avait besoin d'être complété par un niveau de description supplémentaire sous-jacent (variables cachées). Bohr s'opposa fermement à cette hypothèse, mais le débat resta ouvert jusqu'en 1964, quand le mathématicien John Bell démontra un théorème permettant de définir une quantité physique mesurable pour trancher expérimentalement la discussion.

Le théorème de Bell affirme que les théories locales des variables cachées obéissent aux inégalités de Bell ; puisque certaines prédictions de la mécanique quantique (dont les états intriqués) violent les inégalités de Bell, la mécanique

quantique n'est pas compatible avec les théories locales à variables cachées. À partir des années 1970 plusieurs générations d'expériences se sont succédé pour tester l'existence de particules intriquées à des distances de plus en plus grandes, avec un record actuel de 300 km [1]. Les avancées technologiques de ces vingt dernières années dans la fabrication de cristaux non linéaires, fibres optiques, matériaux semiconducteurs ont permis de démontrer des sources de photons intriqués de plus en plus efficaces et compactes, dont certaines sont déjà commercialisées. La violation des inégalités de Bell est aujourd'hui un test très répandu pour quantifier le degré d'intrication produite par les sources.

Des cascades atomiques aux sources paramétriques en matériaux optiques non linéaires

L'intrication, qui peut concerner un ou plusieurs degrés de liberté (polarisation,

spin, impulsion, énergie, mode spatial, mode temporel...), est produite généralement par des interactions directes entre particules élémentaires, via différents types de processus physiques.

Les expériences pionnières des années 70 et 80 ont porté sur la démonstration de l'intrication entre paires de photons corrélés en polarisation générées par des cascades radiatives dans les atomes de calcium (voir encadré) ; successivement, grâce aux progrès dans la maîtrise de fabrication des matériaux optiques, la conversion paramétrique dans des cristaux massifs est devenue la méthode la plus répandue pour produire des photons jumeaux. Dans ce processus, un faisceau laser de pompe dans un milieu optique non linéaire génère des paires de photons appelés signal et complémentaire. Pour que ce processus ait lieu de façon efficace, l'énergie et l'impulsion des photons en jeu doivent être conservées (figure 1).

Cette deuxième condition, appelée aussi accord de phase, n'est pas toujours facile à réaliser du fait de la dispersion des matériaux ; pour y parvenir on utilise la

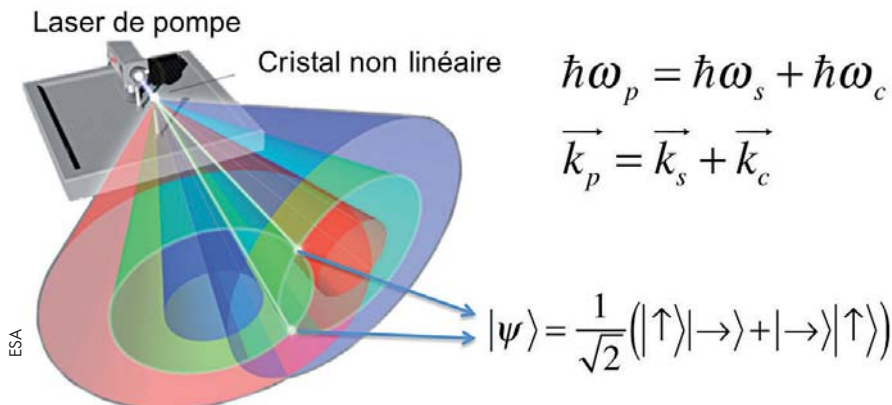
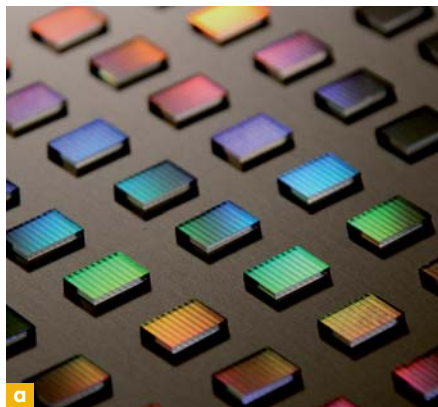
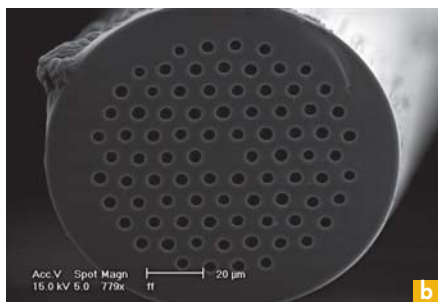


Figure 1. Conversion paramétrique d'un faisceau laser en paires de photons polarisés orthogonalement dans un cristal non linéaire. Pour chacune des deux polarisations (horizontale et verticale) les photons sont émis sur un cône. Les fréquences et les directions d'émissions des photons sont gouvernées par les relations de conservation de l'énergie et de l'impulsion. Les photons aux intersections des deux anneaux verts sont intriqués en polarisation.

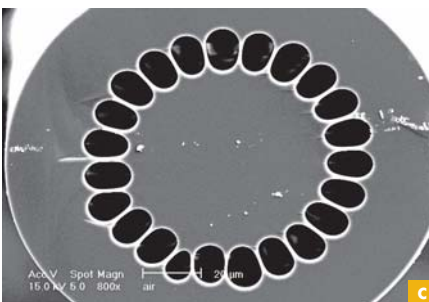


Covision Ltd

Figure 2. (a) Cristaux de niobate de lithium polarisés périodiquement ; la taille des domaines est choisie afin d'inverser la phase dès que l'interférence à trois ondes cesse d'être constructive. Chaque cristal peut contenir plusieurs pistes de périodicités différentes. **(b, c)** Images au microscope électronique à balayage de fibres à cristal photonique produites par le laboratoire XLIM.



XLIM



biréfringence naturelle de certains cristaux ou alors on renverse périodiquement la polarisation ferroélectrique du matériau afin de maintenir en phase les ondes en interaction. Parmi les cristaux les plus utilisés on peut mentionner le PPLN et le PPKT (figure 2).

L'essor de l'information et de la communication quantiques a stimulé à son tour le développement de sources de plus en

plus brillantes et simples à utiliser : l'optique quantique intégrée est un domaine très actif [2]. L'utilisation d'une structure guidante permet de confiner pompe, signal et complémentaire sur toute la longueur du guide (typiquement quelques cm) conduisant ainsi à des efficacités de conversion et de collection de photons élevées. Plusieurs procédés technologiques ont été mis au point pour intégrer

Pour voir loin il faut être précis



ANALYSEUR DE FRONT D'ONDE

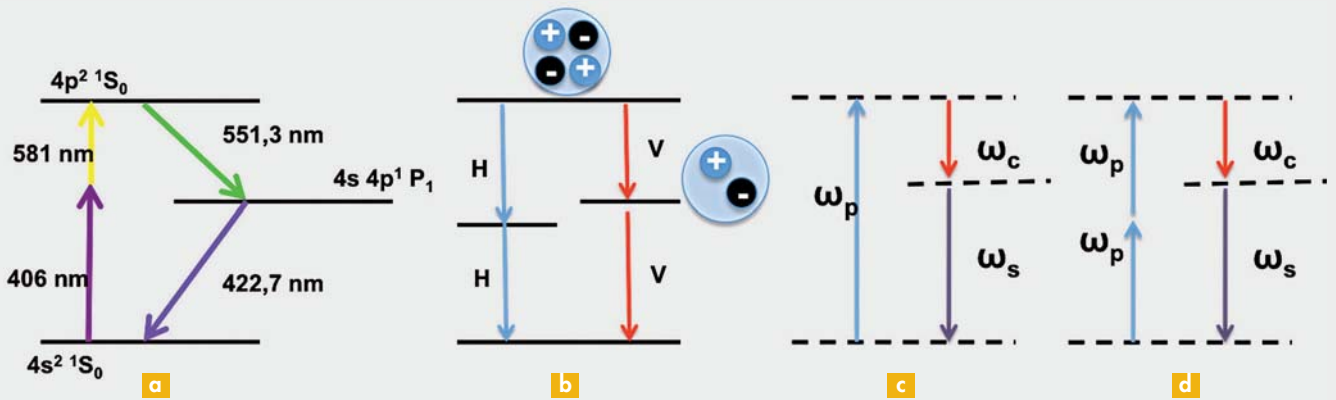
MIROIR DÉFORMABLE OPTIQUE ADAPTATIVE



Métrie optique et optique adaptative pour lasers et microscopie

imagine-optic.com

Créer l'intrication avec différents processus physiques



L'intrication entre paires de photons peut être créée via différents processus physiques, dont nous donnons quelques exemples. Dans l'expérience d'Aspect *et al.* (Phys. Rev. Lett., 1981) les atomes de calcium, pompés sélectivement dans le niveau supérieur par l'absorption non linéaire de deux photons, émettent deux photons corrélés en polarisation (a).

Une boîte quantique sous excitation optique ou électrique peut capturer deux électrons et deux trous pour former un état biexcitonique (b). Un des électrons se recombine avec un des trous en émettant un premier photon ; la paire électron-trou restante se recombine ensuite en générant un deuxième photon. Deux chemins de recombinaison radiative sont possibles à travers deux états excitoniques polarisés orthogonalement. Si la séparation en énergie entre ces deux états est nulle, les deux chemins sont indiscernables et les deux photons émis sont intriqués en polarisation. Les processus de conversion paramétrique sont non résonants et permettent de créer des paires de photons sur une grande plage de longueurs d'onde. Dans le mélange à trois (quatre) ondes un (deux) photon(s) pompe(s) génère(nt) une paire de photons signal et complémentaire qui se partagent son énergie et son impulsion (c, d).

des guides d'onde sur des substrats de cristaux à domaines non linéaires périodiquement renversés jusqu'à atteindre des très faibles taux de pertes optiques et des efficacités de conversion de 10^{-6} paires générées par photon de pompe. Aujourd'hui le degré d'intrication atteint avec ce type de sources est presque parfait.

Les progrès effectués dans les techniques d'élaboration des fibres optiques ont aussi permis de démontrer des sources de photons intriqués ; parmi les résultats les plus marquants nous pouvons citer l'intrication en polarisation dans des fibres optiques en silice, avec une non-linéarité de second ordre induite artificiellement par polarisation thermique. Un effacement périodique de la non-linéarité induite dans la direction de propagation permet ensuite de réaliser la condition de quasi accord de phase. Une deuxième approche ayant conduit à la génération de photons intriqués exploite le processus de mélange à quatre ondes dans des fibres en silice à dispersion décalée ou à cristaux photoniques ; ces techniques d'ingénierie de la dispersion permettent d'ajuster les longueurs d'onde des photons générés

via la condition d'accord de phase afin de séparer la longueur d'onde des photons générés de celle de la pompe [3].

Sources de lumière quantique en matériaux semi-conducteurs

Au cours de ces dernières années, des avancées remarquables ont été réalisées sur les sources de paires de photons en semi-conducteurs ; ce type de matériau, combiné à la maturité technologique de fabrication atteinte pour certaines plateformes (Si, InP, AlGaAs...), ouvre de grandes potentialités en termes d'intégration de nouveaux dispositifs opto-électroniques quantiques. Les approches à l'étude aujourd'hui se focalisent sur trois types de systèmes : les boîtes quantiques, les guides d'onde et les résonateurs en silicium, et les guides d'onde en AlGaAs.

Les boîtes quantiques

Les boîtes quantiques sont des nanostructures semi-conductrices qui confinent les électrons et les trous dans les trois dimensions de l'espace ; ceci leur confère des propriétés proches de celles d'un atome,

si bien qu'elles sont parfois appelées « atomes artificiels ». Dans ces systèmes le processus de désexcitation radiative de deux paires électron-trou appelés excitons a été utilisé pour générer des photons intriqués (voir encadré) en régime de pompage optique et électrique [4]. Cette approche permet d'obtenir des sources presque déterministes, compte tenu du fait qu'une boîte peut émettre une paire par impulsion d'excitation avec une probabilité proche de un, et des progrès récents effectués dans l'efficacité d'extraction des photons générés. À noter que pour exploiter ce processus il est nécessaire que l'énergie thermique du système soit inférieure à l'énergie de l'état lié, ce qui implique un refroidissement des dispositifs à une température de quelques kelvin.

La photonique sur silicium

Les développements récents de la photonique sur silicium ont permis de démontrer des sources de photons intriqués dans des dispositifs intégrés en différents types de géométries (guides d'onde ruban, résonateurs à modes de galerie...) ; puisque le silicium ne présente pas de non-linéarité

d'ordre deux, le processus physique utilisé est le mélange à quatre ondes [5]. Cette approche permet d'obtenir des dispositifs émettant dans la bande télécom, fonctionnant à température ambiante en utilisant la plateforme SOI (*silicon-on-insulator*), compatible avec la technologie CMOS. Un grand nombre de résultats ont été obtenus sur la manipulation d'états à deux ou plusieurs photons sur des circuits photoniques intégrés ; un panorama de faits marquants est présenté sur le site web du projet européen QUANTIP [6]. Le prochain grand défi pour cette plateforme est la possibilité d'intégrer sur les puces photoniques des sources actives, tâche rendue difficile par la bande interdite photonique indirecte du silicium.

La plateforme AlGaAs

La génération paramétrique dans des guides semiconducteurs à gap direct est un processus qui permet de réaliser des dispositifs fonctionnant à température

ambiante, tout en gardant la possibilité d'intégrer le laser de pompe avec le milieu non linéaire. Plusieurs avancées ont été réalisées récemment en utilisant le mélange à trois ondes sur la plateforme AlGaAs qui permet de combiner des efficacités de conversion élevées ($\chi^{(2)}$) du GaAs ≈ 110 pm/V à 1 550 nm) avec l'émission de photons jumeaux dans la bande la plus utilisée des télécommunications (1 530 – 1 565 nm). Puisque ce matériau n'est pas biréfringent, diverses solutions ont été proposées pour satisfaire la condition d'accord de phase parmi lesquelles la biréfringence de forme (qui consiste à induire une biréfringence artificielle en alternant des couches de GaAs et d'un oxyde - AlO_x), le quasi-accord de phase (en réalisant des guides présentant des domaines de non-linéarité inversée par des techniques de reprise de croissance sur des substrats micro-structurés), l'accord de phase modal (qui consiste à faire interagir différents types de modes guidés

dont l'indice effectif a été spécifiquement dessiné), l'accord de phase contra-propageant (avec un faisceau de pompe transverse par rapport aux photons émis).

À titre d'exemple nous présentons deux types de dispositifs démontrés très récemment qui génèrent des paires de photons jumeaux dans la bande spectrale télécom : le premier est une microcavité gravée en forme de ruban conçue de façon telle qu'un faisceau de pompe, incident sur la surface du guide avec un certain angle d'incidence, génère deux faisceaux guidés se propageant en directions opposées et polarisés orthogonalement (*figure 3*). En pompant le dispositif avec deux angles d'incidence correspondant à la dégénération en fréquence des photons générés, les inégalités de Bell ont pu être violées en démontrant que les photons émis présentent un fort niveau d'intrication [7]. Cette géométrie de pompage permet par ailleurs de jouer de façon simple avec l'intrication sur un autre degré de liberté,

IDS : IDS élargit sa gamme de caméras USB 3.0 avec trois nouvelles familles

IDS Imaging Development Systems GmbH propose trois nouvelles familles de caméras USB 3.0 en plus des séries à succès USB 3 uEye CP, introduites sur le marché en 2011. Que ce soit des caméras à encombrement réduit ou des versions caméras-carte, ou encore des versions à boîtier robuste et néanmoins légères ! Les nouvelles familles sont un excellent choix pour les toutes les demandes critiques, en termes de coûts, dans les applications en automatisme, en robotique, dans l'emballage, l'instrumentation, le transport et l'imagerie médicale. La manipulation de l'intégration et de la caméra elle-même est très simple grâce au Plug & Play d'USB et au pack logiciel IDS gratuit « Software Suite », sophistiqué et identique pour l'ensemble des caméras uEye.

Pour les applications à volume, caméra parfaite et rentable : version avec boîtier USB 3 uEye LE monture d'objectif C/CS

Elle est non seulement très légère, en raison de son boîtier plastique, mais encore assez robuste pour les environnements industriels.

Version Caméra-carte USB 3 uEye LE monture S-Mount ! 36 x 36 mm

La caméra dispose d'un connecteur 8 broches et une alimentation 5 V, un trigger, un flash, 2 ports GPIO et un bus I²C pour le déclenchement d'appareils externes.

Caméra polyvalente pour la construction mécanique : USB 3 uEye ML monture d'objectif C/CS

Pesant seulement 41 g et mesurant 47 x 46 x 28 mm, la caméra USB 3 uEye ML est parfaite pour toutes les applications où l'espace est restreint. Grâce aux deux ports GPIO, au trigger et au flash opto-couplés, la USB 3 uEye ML est adaptée à une grande variété d'applications.

Séries uniques en leur genre - une caractéristique commune : excellente qualité d'image

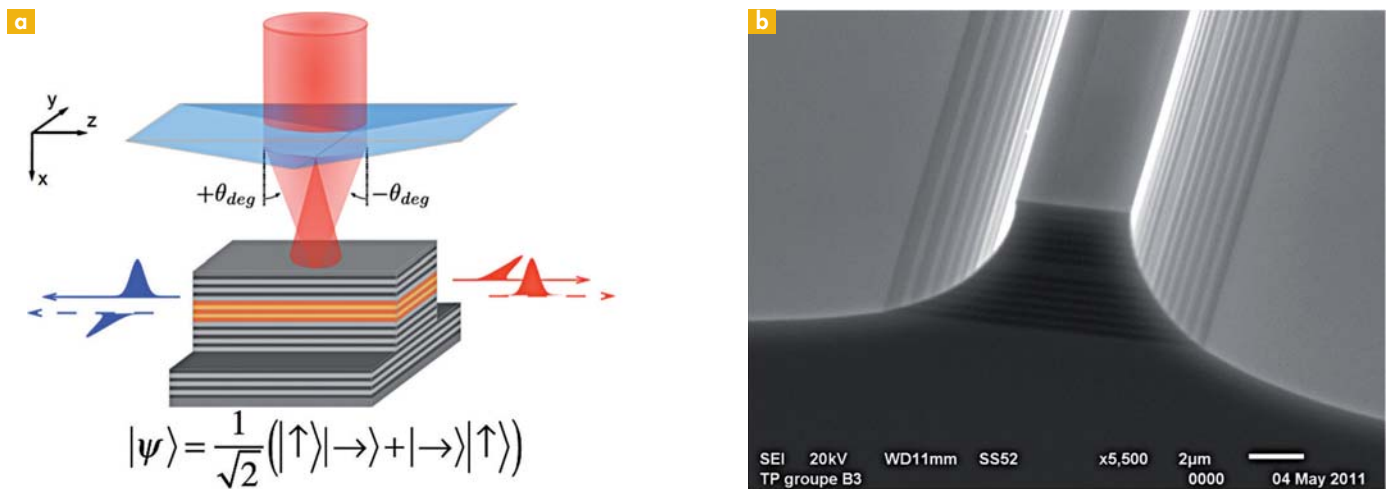
Tous les modèles sont équipés des tout derniers capteurs haute sensibilité CMOS d'Aptina 5 mégapixels et e2v 1,3 et 2 Mp et NIR.

Mise à niveau simplifiée !

IDS a fait du passage d'USB 2.0 à la technologie USB 3.0 un jeu d'enfant grâce à la suite logicielle IDS qui fonctionne sur toutes les caméras IDS. De plus, la caméra USB 3 uEye LE est de même encombrement que les modèles USB 2.0, ainsi la transition vers la technologie USB 3.0 en est simplifiée.



Contact
IDS Imaging Development
System GmbH
www.ids-imaging.fr/usb3



$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle|\rightarrow\rangle + |\rightarrow\rangle|\uparrow\rangle)$$

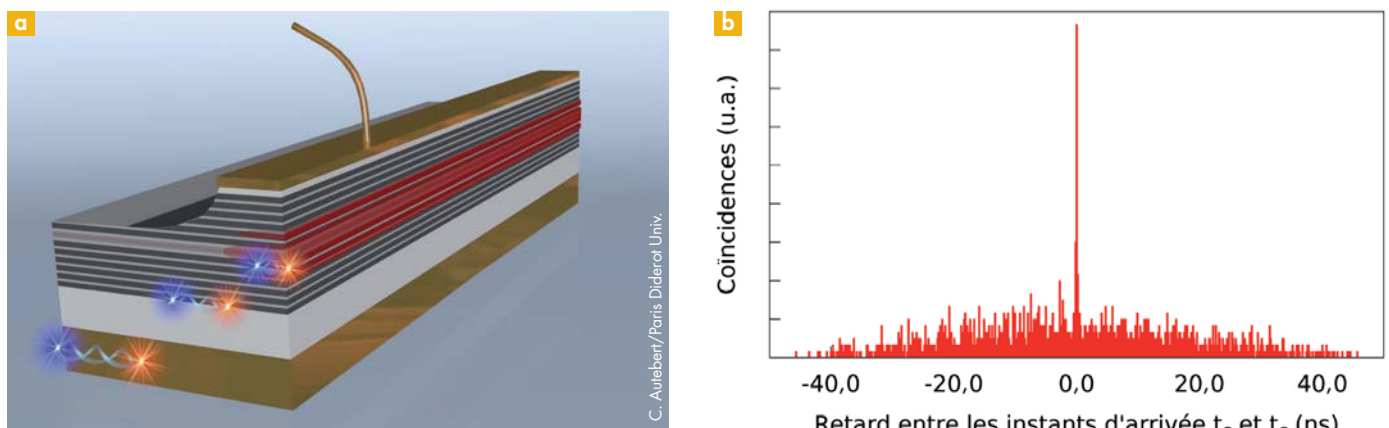


Figure 4. (a) Schéma de la première source de photons jumeaux injectée électriquement fonctionnant à température ambiante. Un courant électrique génère un faisceau laser (en rouge dans la structure) qui est converti en paires de photons à l'intérieur du dispositif lui-même. (b) Histogramme de coïncidences entre les instants d'arrivée de photons signal et complémentaire.

les corrélations entre les fréquences des deux photons de la paire, qui peuvent être contrôlées via les propriétés spatiales et spectrales du faisceau de pompe.

Le deuxième dispositif est une source de photons jumeaux très compacte injectée électriquement et fonctionnant à température ambiante : ici le laser de pompe et le milieu non linéaire sont complètement intégrés. La structure, au cœur de laquelle se trouve un puits quantique, est optimisée pour générer l'émission laser et la convertir directement en paires de photons à l'intérieur du même dispositif (figure 4). La condition d'accord de phase est obtenue en faisant de l'ingénierie de la dispersion des modes guidés par la structure : le mode laser, guidé par des miroirs

de Bragg, est accordé en phase avec les modes fondamentaux TE_{00} et TM_{00} autour de 1,55 μm. L'échantillon est alimenté avec des impulsions électriques de durée 60 ns à un taux de répétition de 40 kHz. La démonstration de l'émission des photons par paires est effectuée en séparant les deux photons de chaque paire par leur polarisation et en mesurant les corrélations temporelles entre leurs instants d'arrivée sur les détecteurs.

Tous ces résultats ouvrent des perspectives vers de nouvelles générations de dispositifs dans lesquels la production, manipulation et mesure d'états quantiques de la lumière se font sur une même puce et constituent un pas important vers une large diffusion des technologies quantiques.

Références

- [1] A. Aspect, Une nouvelle révolution quantique, Demain la Physique, Editions O. Jacob (2004).
- [2] S. Tanzilli *et al.* Laser & Photonics Reviews **6**, 115 (2012).
- [3] E.Y. Zhu *et al.* Phys. Rev. Lett. **108**, 213902 (2012) ; A. R. McMillan *et al.* Opt. Express **17**, 6156 (2009).
- [4] A. Dousse *et al.* Nature **466**, 09148 (2010) ; Salter *et al.* Nature **465**, 09078 (2010).
- [5] H. Takesue *et al.* Opt. Express **16**, 5721 (2008).
- [6] <http://www.phy.bris.ac.uk/groups/cqp/quantip/HOME.html>
- [7] A. Orioux *et al.* Phys. Rev. Lett. **110**, 160502 (2013) ; F. Boitier *et al.* Phys. Rev. Lett. **112**, 183901 (2014).