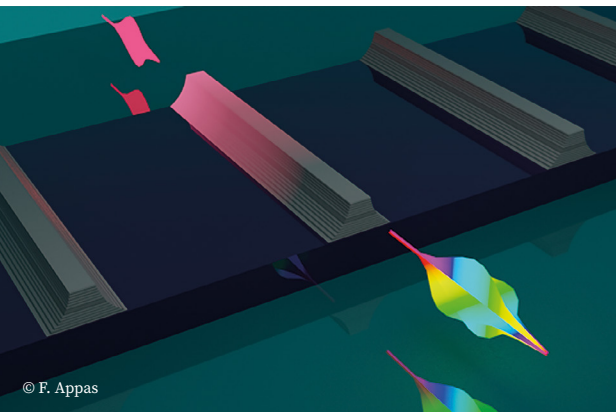


GÉNÉRATION DE PHOTONS INTRIQUÉS POUR LES COMMUNICATIONS QUANTIQUES AVEC DES DISPOSITIFS NON-LINÉAIRES AlGaAs

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

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

*sara.ducci@u-paris.fr



© F. Appas

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

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

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

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

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

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

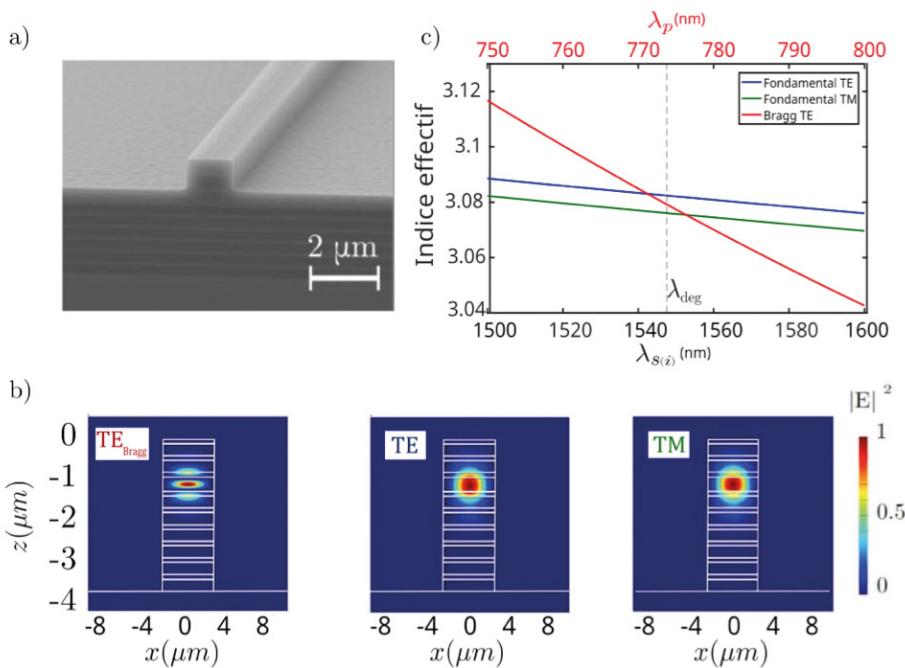
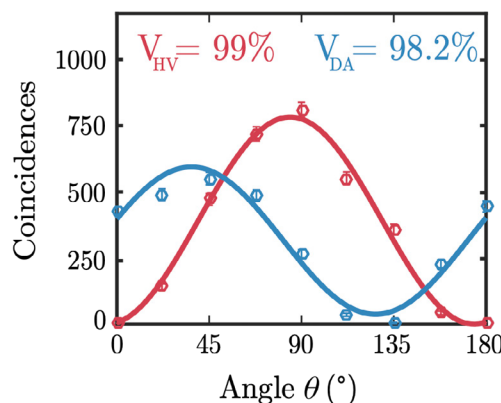


Figure 1. a) image d'un guide AlGaAs à miroirs de Bragg réalisée au microscope optique à balayage; b) simulation numérique du profil spatial des modes guidés impliqués dans le processus de conversion paramétrique spontanée (SPDC) utilisé pour la génération de paires de photons; c) dispersion des indices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

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

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



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

GÉNÉRATION D'ÉTATS INTRIKUÉS LARGE BANDE AVEC DES GUIDES AlGaAs

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

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

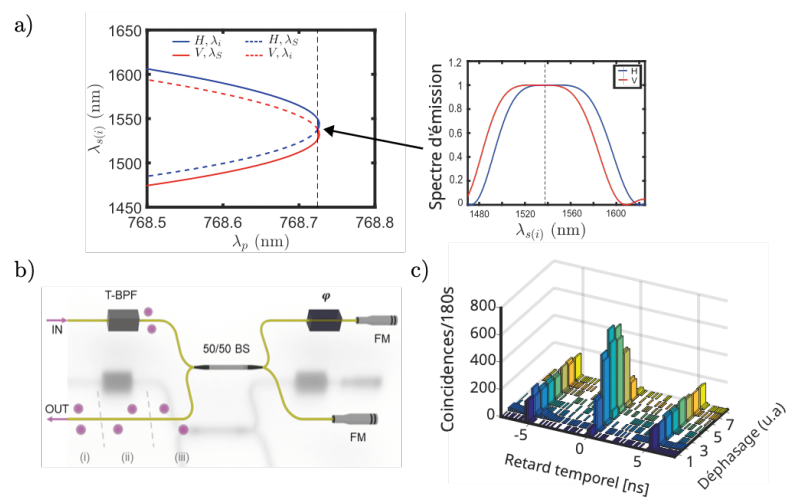
(Fig. 1)¹. La croissance des échantillons est effectuée par épitaxie par jets moléculaires, et la fabrication des guides est réalisée suivant des techniques standard de lithographie et gravure utilisées pour les semi-conducteurs III-V. Le taux typique de génération de paires de photons est de $\sim 10^6\text{-}10^7\text{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

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

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

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

GÉNÉRATION D'INTRICATION EN POLARISATION ET ÉNERGIE-TEMPS



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

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

VERS DES CIRCUITS PHOTONIQUES QUANTIQUES HYBRIDES POUR LES COMMUNICATIONS QUANTIQUES

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

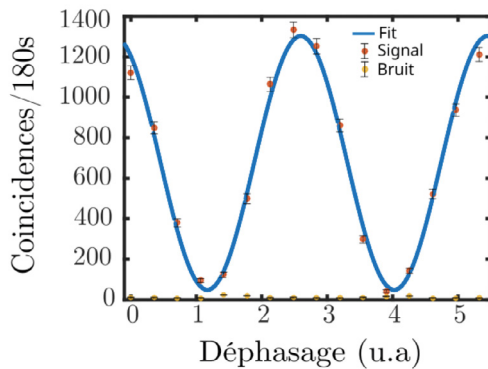
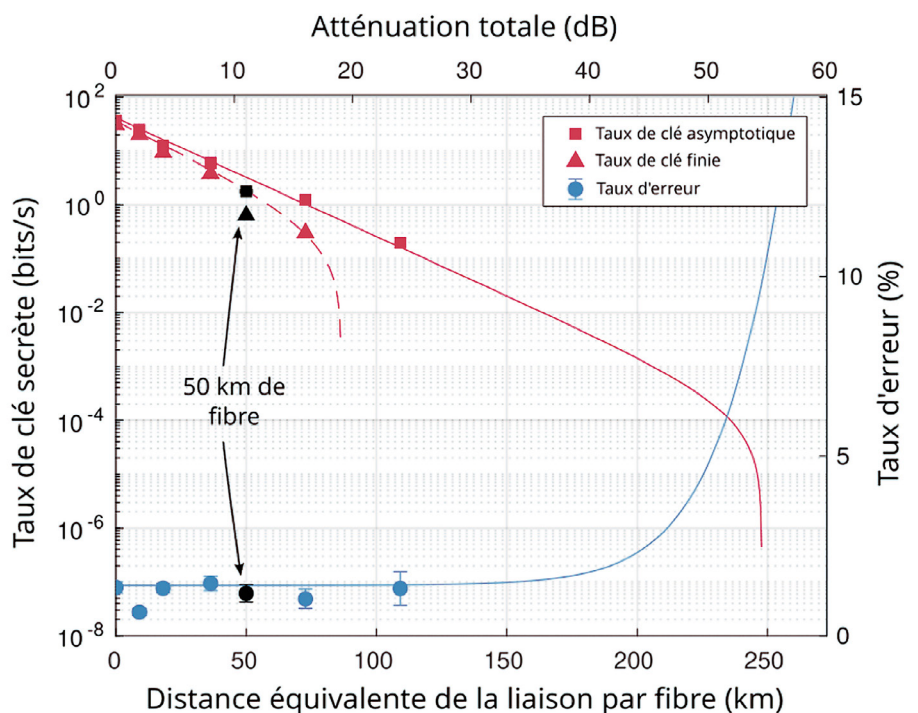


Figure 3. Courbe de corrélations obtenues en mesurant le nombre de paires de photons arrivant simultanément aux détecteurs en fonction du déphasage appliqué sur un des deux bras de l'interféromètre de Franson (voir panel b de l'encadré).

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

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

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



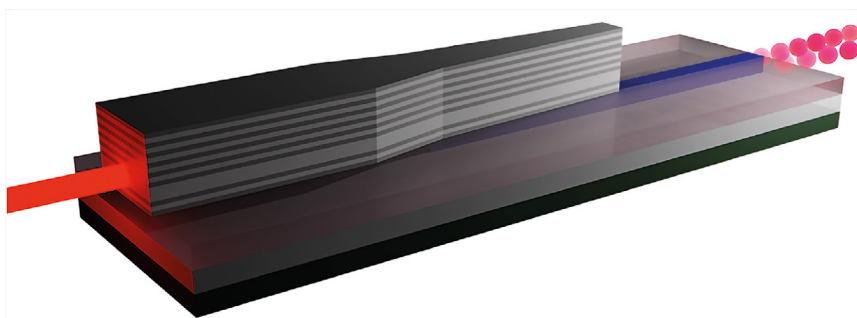


Figure 5. Dessin de la structure hybride AlGaAs/SOI : le faisceau de pompe produit par SPDC des paires de photons dans un guide d'onde AlGaAs à miroirs de Bragg (structure multicouche en gris). Ces paires sont ensuite transférées dans un guide SOI (en bleu) collé monolithiquement. Dans ce dispositif,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

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

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

CONCLUSION

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

RÉFÉRENCES

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



PICOQUANT

par **OPTON LASER**
INTERNATIONAL

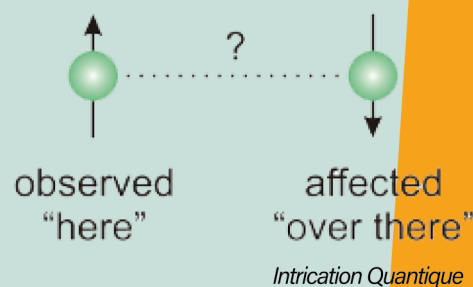
NEW!

HYDRAHARP 500

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



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



www.optonlaser.com