

# TOMOGRAPHIE QUANTIQUE ET PROTOCOLE DE DISTRIBUTION RECONFIGURABLE MULTI-UTILISATEURS À BASE DE PORTES QUANTIQUES FRÉQUENTIELLES

**Antoine Henry<sup>1</sup>, Dario Fioretto<sup>2</sup>, Lorenzo Procopio<sup>3</sup>, Stéphane Monfray<sup>4</sup>, Frédéric Boeuf<sup>4</sup>, Laurent Vivien<sup>2</sup>, Eric Cassan<sup>2</sup>, Carlos Ramos<sup>2</sup>, Kamel Bencheikh<sup>2</sup>, Isabelle Zaquine<sup>1</sup>, Nadia Belabas<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *LTCI, Télécom Paris, Institut Polytechnique de Paris, 19 place Marguerite Perey, 91120, Palaiseau, France*

<sup>2</sup> *Centre for Nanosciences and Nanotechnology, CNRS, Université Paris-Saclay, UMR 9001, 10 Boulevard Thomas Gobert, 91120, Palaiseau, France*

<sup>3</sup> *Faculty of Physics, Weizmann Institute of Science, Rehovot 7610001, Israel*

<sup>4</sup> *STMicronics SAS, 850 rue Jean Monnet, 38920 Crolles, France*

antoine.henry@telecom-paris.fr

## RÉSUMÉ

Nous utilisons une combinaison de composants fibrés fonctionnant aux longueurs d'ondes télécom pour paralléliser de manière indépendante des portes quantiques agissant sur des qubits encodés en fréquence, afin de distribuer des états intriqués en fréquence issus d'un résonateur SOI d'ISL=21 GHz à plusieurs paires d'utilisateurs.

**MOTS-CLEFS :** *domaine fréquentiel, portes quantiques, parallélisme, QKD*

L'utilisation du degré de liberté fréquentiel du photon permet de paralléliser un grand nombre de qubits, ou de qudits, encodés en fréquence dans un seul mode spatial. La manipulation de tels objets quantiques offre des perspectives intéressantes de mise à l'échelle. Le nombre de composants optiques nécessaires pour implémenter des portes logiques n'augmente en effet pas avec le nombre de qubits [1]. Nous implémentons des portes quantiques dans le domaine des fréquences et aux longueurs d'ondes télécom en utilisant un micro-résonateur de Silicium sur Isolant SOI (Fig. 1a-b) et des composants fibrés. Des paires de photons intriqués en fréquence (qu-bit i.e. qu-dit à  $d = 2$ ) ont été démontrées récemment [2, 3] en utilisant des sources d'intervalle spectral libre (ISL) ne permettant pas de passage à l'échelle en terme de dimension  $d$  du qu-dit fréquentiel, pour ce schéma de manipulation. Nous utilisons une source de paires de photons adaptée aux composants fibrés programmables utilisés pour la manipulation des bins de fréquence. Nous démontrons une porte Hadamard dans le domaine des fréquences Avec une Fidélité de  $0.997 \pm 0.006$  et une Probabilité de succès de  $0.949 \pm 0.005$  comparables à l'état de l'art, ainsi que sa parallélisation (Fig. 1d), une intrication fréquentielle large bande (Fig. 1e) et des photons encodés en fréquence pour créer un réseau de distribution (Fig. 1f). Ce réseau de distribution est versatile en terme de topologie et économique en ressource de par l'utilisation du domaine fréquentiel.

Les paires de photons sont produites par un micro-résonateur SOI en spirale, d'intervalle spectral libre 21 GHz. Les composants utilisés sont deux modulateurs électro-optiques (MEO) appliquant au signal optique une phase sinusoïdale de fréquence  $\Omega$ , d'amplitude  $\mu$  et de phase  $\theta$  et un filtre programmable (FP) entre les deux qui peut appliquer un déphasage  $\alpha_i$  entre les deux modes de chaque qubit  $i$  (Fig. 1c.). La possibilité de paralléliser des portes quantiques et de les adresser indépendamment pour manipuler des qubits encodés en fréquence nous permet de distribuer jusqu'à 8 paires de photons intriqués en fréquence. Pour valider notre approche, nous effectuons la tomographie de l'état quantique de chaque paire à l'aide d'un seul et même montage composé de modulateurs électro-optiques et de filtres programmables. Nous mesurons une fidélité à un état intriqué en fréquence d'en moyenne 90% sur des bandes spectrales qui utilisant un espace de 35 modes fréquents adressables (Fig. 1b.). L'indépendance de chaque porte nous permet alors de générer et de démultiplexer les photons de chaque paire afin de les

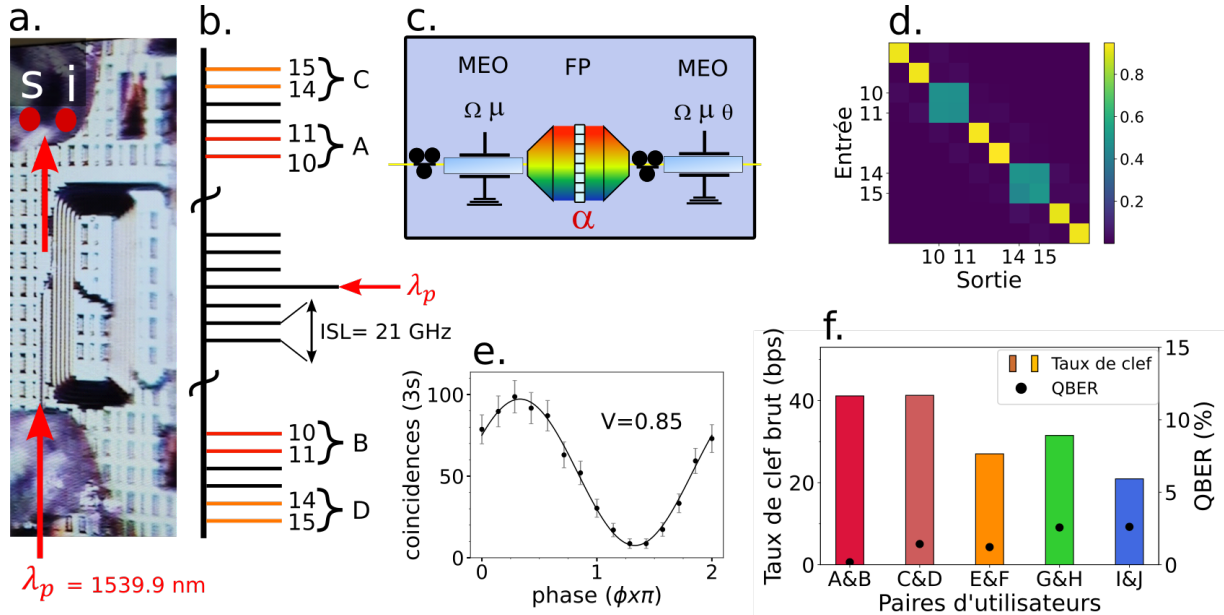


FIGURE 1 : Les paires de photons issues du micro-résonateur (a.)  $g_h^{(2)} = 0.07$  peuvent être séparées spectralement en plusieurs qubits (b.). Ces qubits peuvent être manipulés par un seul et même ensemble de composants (c.). Pour chaque qubit, on applique une transformation porte de Hadamard en fréquence (d.). Cela nous permet de mesurer l'intrication des paires de photon dans le domaine des fréquences (e.). Ces photons peuvent alors être utilisés dans des protocoles d'information quantique (f.).

distribuer à différents couples d'utilisateurs. Il est possible de montrer que les deux paires sont intriquées en faisant varier la phase relative  $\phi$  d'un état intriqué  $\propto |k_i, k_s\rangle + e^{i\phi} |k + 1_i, k + 1_s\rangle$ , en amont d'une porte Hadamard, et en mesurant les coïncidences entre le signal et l'idler (Fig. 1e.).

Nous démontrons un taux de génération de clef brut variant de 20 à 40 bit/s en distribution locale, et un taux d'erreur (QBER variant de 1 à 5 %) (Fig. 1f). Cette expérience constitue une preuve de principe d'un protocole de distribution de clef quantique (BBM92)[4] dans le domaine des fréquences. Ce schéma nous permet non seulement de connecter plusieurs paires d'utilisateurs de façon aisément reconfigurable, mais également de mesurer l'état des paires de photon de manière indépendante, avec une complexité expérimentale réduite. Nous créons ainsi une plateforme de distribution et de mesure commune à chaque utilisateur. Cet aspect contraste avec les expériences réalisées avec des paires de photons encodées en polarisation, où chaque utilisateur a besoin d'un système de tomographie.

A l'aide d'une combinaison de composants fibrés commerciaux, fonctionnant dans le domaine télécom, nous implémentons des portes quantiques en parallèle capables d'adresser plusieurs qubits. Nous utilisons ce schéma pour distribuer des états intriqués en fréquence. Le fonctionnement aux longueurs d'ondes télécom en fait une plateforme idéale pour une implémentation dans les réseaux de communications classiques disponibles.

## RÉFÉRENCES

- [1] H.-H. Lu *et al.*, "Electro-Optic Frequency Beamsplitters and Tritters for High-Fidelity Photonic Quantum Information Processing," *Physical Review Letters*, vol. 120, 2018.
- [2] M. Kues *et al.*, "On-chip generation of high-dimensional entangled quantum states and their coherent control," *Nature*, vol. 546, pp. 622–626, 2017.
- [3] P. Imany *et al.*, "50-GHz-spaced comb of high-dimensional frequency-bin entangled photons from an on-chip silicon nitride microresonator," *Optics Express*, vol. 26, pp. 622–626, 2018.
- [4] F. Appas *et al.*, "Flexible entanglement-distribution network with an AlGaAs chip for secure communications," *npj Quantum Information*, vol. 7, pp. 1–10, 2021.