

	Supraconducteur	Spin dans silicium	Ions piégés	Photons	Atomes
Taille	(100 μm) ²	(100 nm) ²	(1 mm) ²	~(100 μm) ²	(1 μm) ²
Robustesse	~99,3 %	>98 %	99,9 %	50 % (mesure) 98 % (portes)	95 %
Rapidité	250 ns	~5 ns	100 μs	1 ms	1 ms
Variabilité	3 %	0,1 % – 0,5 %	0,0001 %	0,5 %	0,0001 %
Température d'opération	50 mK	1 K	300 K	4 K	300 K
Connectivité	4	4	10	2	10
Nombre record de qubits intriqués	53	2	20	18	51

Les performances des qubits se comparent sur la base de quelques caractéristiques essentielles. Du point de vue physique, les paramètres clés sont la taille effective du qubit, la robustesse face aux erreurs de calcul et la rapidité des opérations quantiques. D'autres caractéristiques, d'ordre technologique, sont surtout pertinentes pour le passage à grande échelle : la connectivité afin de réaliser des portes logiques à plusieurs qubits en une seule opération, la variabilité (des fréquences de Larmor), qui évalue l'effort à déployer pour calibrer les qubits et enfin la température d'opération. Pour chacun, le record du nombre de qubits intriqués est indiqué.

➤ Beaucoup d'acteurs du domaine s'y emploient, que ce soit des laboratoires académiques, des services de recherche et développement d'entreprises installées (Intel) ou encore des start-up (Silicon Quantum Computing, Equal1). Notons que pour cette technologie, la part des ingénieurs, en l'occurrence en microélectronique, va bien au-delà de ce qu'on peut observer pour les autres systèmes en course en raison de la nécessité de s'appuyer sur des technologies éprouvées de la microélectronique pour améliorer la performance des qubits.

ET LA LUMIÈRE FUSE

Les types de qubits que nous avons décrits sont fondés sur des particules massives et fonctionnent de façon très semblable : ils sont faciles à comparer (voir le tableau ci-dessus). Ils constituent la grande majorité des systèmes candidats au calcul quantique à l'exception notable des photons intriqués, que l'on sait depuis longtemps produire et manipuler avec précision. Dans l'exploration de cette voie, les différences principales résident dans la nature évanescence du photon optique et dans la difficulté à faire interagir deux photons. La seconde propriété fait écho au caractère très isolé du photon ce qui en fait sans doute le système quantique individuel le plus cohérent et immune aux erreurs. Ces particularités rendent inapplicables les protocoles utilisés pour les particules massives où le caractère déterministe de l'interaction entre qubits existants sur des temps longs est primordial. Elles ont poussé la communauté à développer des protocoles spécifiques aux photons

BIOGRAPHIE

A. CRIPPA ET AL., Gate-reflectometry dispersive readout and coherent control of a spin qubit in silicon, *Nature Communications*, vol. 10, article 2776, 2019.

W. HUANG ET AL., Fidelity benchmarks for two-qubit gates in silicon, *Nature*, vol. 569, pp. 532-536, 2019.

F. ARUTE ET AL., Quantum supremacy using a programmable superconducting processor, *Nature*, vol. 574, pp. 505-510, 2019.

D. BARREDO ET AL., Synthetic three-dimensional atomic structures assembled atom by atom, *Nature*, vol. 561, pp. 79-82, 2018.

X. QIANG ET AL., Large-scale silicon quantum photonics implementing arbitrary two-qubit processing, *Nature Photonics*, vol. 12, pp. 534-539, 2018.

N. FRIIS ET AL., Observation of entangled states of a fully controlled 20-qubit system, *Physical Review*, vol. 8(2), article 021012, 2018.

et à notamment augmenter le nombre de photons nécessaires pour définir un qubit. Ils reposent sur la conception de détecteurs à photons et sources d'états intriqués très efficaces. Un important effort de recherche, aussi bien dans des laboratoires académiques que dans des start-up (Quandela, PsiQuantum), est aujourd'hui consacré pour améliorer la performance de ces briques élémentaires.

Un pas important dans cette direction a été franchi ces dernières années avec des expériences quantiques à plusieurs photons dans des circuits photoniques en silicium (voir la figure page 81, en haut). Cependant les premières démonstrations liées aux protocoles viables à plus grande échelle sont encore attendues, et elles devront être confrontées quantitativement aux exigences du calcul quantique. Arriver à se prémunir des limitations des photons pourrait conduire à l'émergence d'un système très cohérent avec peu d'erreurs, un pas important vers une machine NISQ efficace.

Beaucoup de plateformes se développent et prétendent à concourir au titre de qubit idéal pour le calcul quantique. Elles sont portées par des acteurs des mondes académique et industriel. La course est lancée, mais aucun système ne semble prendre l'avantage, aucune échappée n'apparaît. On peut même imaginer que la diversité des applications du calcul quantique sera si importante qu'elle rendra nécessaire l'utilisation de différentes plateformes avec des propriétés physiques et technologiques distinctes. Et la notion de record de nombre de qubits perdra un peu de son sens... ■