

L'avenir de ces systèmes repose sur des travaux menés au sein de laboratoires académiques et dans des start-up (IONQ, Alpine Quantum Technologies, Honeywell, Pasqal). Il s'agira surtout de développer des techniques de manipulation aussi avancées en termes de contrôle simultané que celles utilisées pour les qubits supraconducteurs. Restera aussi à passer à plus grande échelle, avec un effort en ingénierie plus difficile à évaluer que pour les systèmes de matière condensée.

LA REVANCHE DU SILICIUM

Après la vitesse et la fidélité des opérations menées sur les qubits, un autre point crucial dans le développement d'ordinateurs quantiques réside dans la possibilité des très grandes échelles (LSQ), au-delà du million de qubits. Une piste prometteuse se trouve du côté des qubits de spins dans les circuits semi-conducteurs quantiques. L'élément de base est un électron individuel piégé électrostatiquement dans une structure semiconductrice, élément de base de l'électronique moderne permettant de sculpter à volonté le potentiel vu par les électrons. Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus célèbre, et on le trouve dans la plupart des microprocesseurs des ordinateurs classiques. De plus, cet élément se comporte comme un vide magnétique pour le spin ce qui protège efficacement le spin électronique des perturbations extérieures.

Avec des tailles micrométriques de qubits (voir la figure page ci-contre, en bas), facilitant leur manipulation, et les capacités de la filière de la microélectronique du silicium, cette technologie a beaucoup d'atouts sur le papier en vue d'une intégration à grande échelle. D'autant plus que toutes les opérations élémentaires du calcul quantique sont accessibles et que les fidélités et les vitesses des opérations sont au rendez-vous. C'est remarquable, dans la mesure où les premières démonstrations de qubit dans le silicium datent de seulement huit ans.

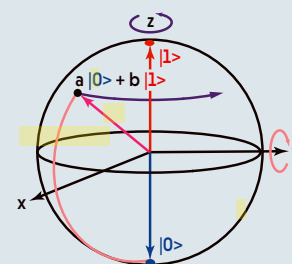
Toutefois, ces avantages méritent d'être renforcés de sorte que l'on puisse aller au-delà de deux qubits, l'état de l'art de cette technologie. ➤

LE QUBIT SUPRACONDUCTEUR EST LE SYSTÈME LE PLUS AVANCÉ SUR LE MARCHÉ DES MACHINES QUANTIQUES

LE QUBIT IDÉAL

Dès le début de la course aux processeurs quantiques, les critères qu'un « bon » qubit doit satisfaire furent rapidement établis. Il doit être constitué d'un doublet d'états quantiques $|0\rangle$ et $|1\rangle$ et être initialisable de façon fidèle. En outre, il doit être muni d'une commande afin de réaliser (en un temps noté T_1) n'importe quelle porte à un qubit (analogue quantique de la porte logique NON transformant 0 en 1 et vice versa). Ces portes se comprennent mieux à l'aide d'une représentation géométrique de l'ensemble des états quantiques $a|0\rangle + b|1\rangle$ (a et b sont des nombres complexes) accessibles au qubit : la sphère de Bloch. Dans cette représentation (voir la figure, à droite), un état est une flèche pointant à la surface de la sphère (en magenta), les états $|0\rangle$ et $|1\rangle$ étant aux pôles, tandis qu'une porte se traduit par une rotation de l'état d'un certain angle autour d'un axe (en rose et en violet). Le qubit idéal doit aussi pouvoir être couplé à un autre

qubit de façon à réaliser une porte logique à deux bits (en un temps noté T_2). Cette porte doit être « universelle », dans le sens où tout algorithme quantique doit être décomposable en cette porte et en portes à un bit. Le qubit idéal est intégrable en grand nombre dans un processeur. La cohérence quantique des superpositions de ses deux états doit se maintenir durant un temps T_2 bien supérieur aux temps T_1 et T_2 associés aux deux types de portes. Le qubit idéal est enfin muni d'un dispositif permettant de lire son état « en un coup », de façon fidèle. Qu'est-ce que cela signifie ? Dans la première étape d'une mesure, un qubit se trouvant initialement dans un état $a|0\rangle + b|1\rangle$ finit toujours dans l'état soit $|0\rangle$, soit $|1\rangle$ (on dit qu'il est « projeté »), avec les probabilités respectives $|a|^2$ et $|b|^2$. Le détecteur extrait alors de l'information du qubit pour déterminer cet état final et indiquer 0 ou 1. Quand il est



suffisamment sensible pour que l'expérimentateur puisse lire sans équivoque le résultat, la mesure est dite « en un coup ». Dans le cas inverse, le même état initial doit être préparé et mesuré un grand nombre de fois, les mesures étant alors moyennées. Une lecture en un coup n'est jamais parfaitement fidèle, car le détecteur indique parfois 0 quand le qubit est projeté sur $|1\rangle$ et réciproquement. On la caractérise alors par sa fidélité, c'est-à-dire la probabilité de lire un résultat correct. Dans le cas idéal, la fidélité est de 100 %.

	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

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... ■

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.