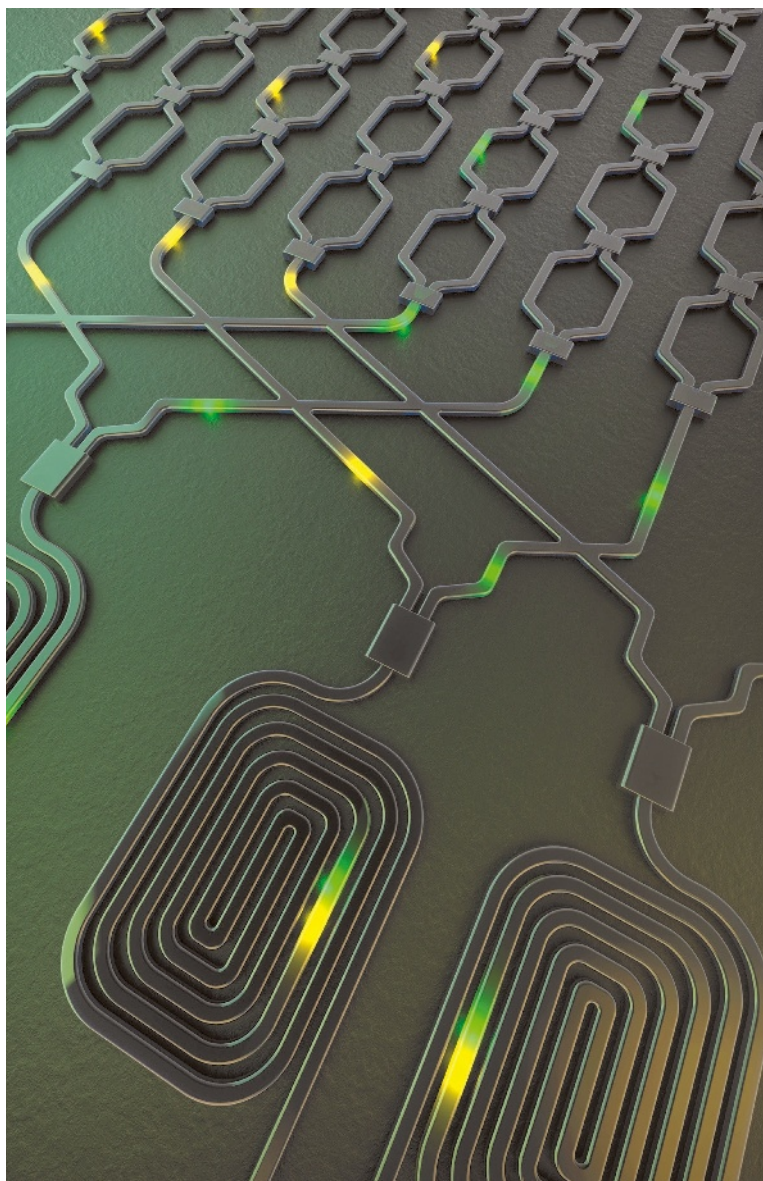
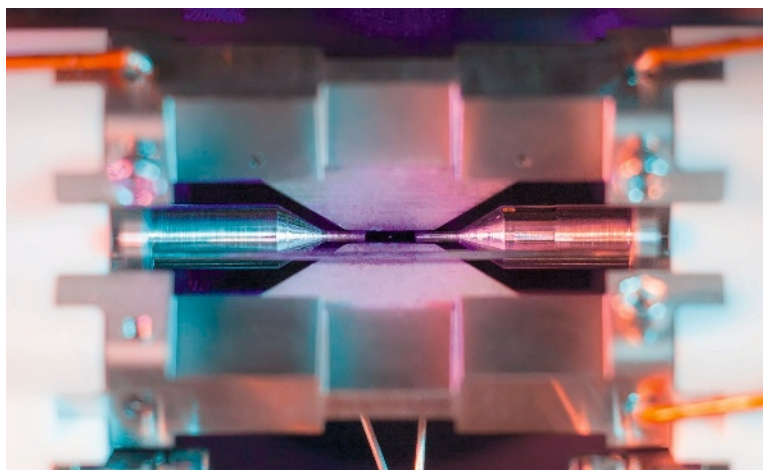




Des qubits sous la forme de photons sont créés dans les spirales puis guidés le long de pistes en silicium pour effectuer différentes tâches.



Un ion de strontium (le petit point au centre, la fluorescence apparaît après un temps de pose de 30 secondes) a été piégé dans une enceinte ultravide entre deux électrodes. De tels ions piégés pourraient constituer des qubits.

systèmes issus de la physique ou de la chimie et gouvernés par des propriétés quantiques, ceux ayant atteint ces objectifs avec une précision suffisante sont rares, et c'est à eux que nous nous intéresserons ici. Précisons que cette sélection n'est valable qu'à un instant donné, aujourd'hui, et reste tributaire de nos connaissances, encore en construction, sur l'ordinateur quantique et de notre capacité à contrôler les systèmes quantiques. Le même exercice dans quelques années pourrait conduire à une liste différente.

Les qubits retenus se distinguent notablement en termes de performances et de géométrie, autant de caractéristiques liées à des paramètres physiques et technologiques, comme la vitesse et la robustesse des opérations quantiques, la taille effective du qubit, la variabilité des paramètres de fonctionnement du qubit... (voir le tableau page 84) et aucun n'est pour le moment incontournable au vu des contraintes de l'ordinateur quantique.

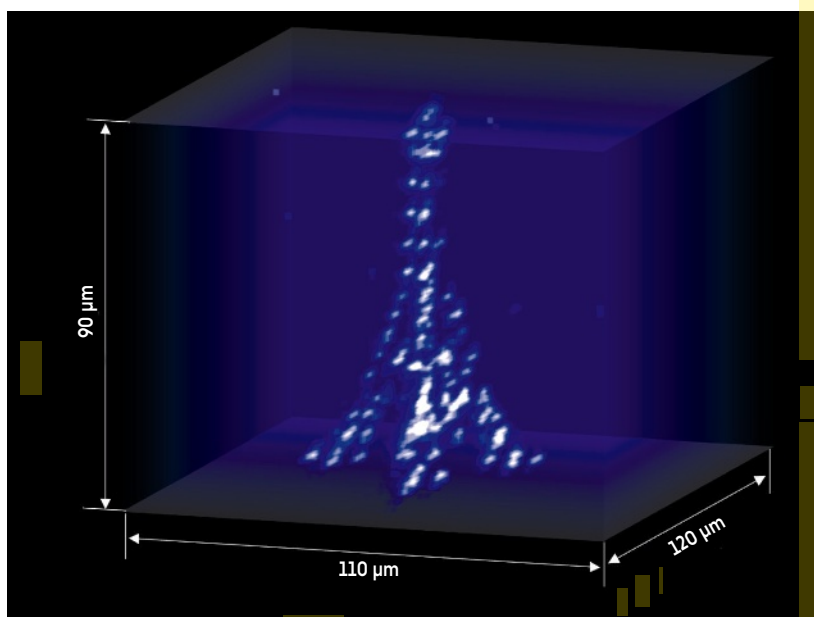
LA VOIE DU SUPRACONDUCTEUR

La vitesse d'opération est clairement importante, car elle détermine la rapidité du processeur quantique. Si elle devient le facteur clé, alors le choix le plus judicieux est clair aujourd'hui : miser sur les qubits de type supraconducteur (voir la figure page ci-contre), c'est-à-dire dépourvu de résistance électrique à basse température. L'étude de ces objets a commencé il y a plus de quarante ans lorsque diverses expériences ont montré le comportement globalement quantique du circuit supraconducteur le plus simple : la jonction Josephson. Cet élément est constitué de deux électrodes supraconductrices séparées par un mince isolant électrique que peuvent traverser, par effet tunnel, des paires d'électrons (dites «de Cooper»). Refroidis à des températures d'environ 20 millikelvins, les circuits à jonction Josephson se comportent comme des atomes artificiels à deux états possibles, le prérequis pour être un qubit.

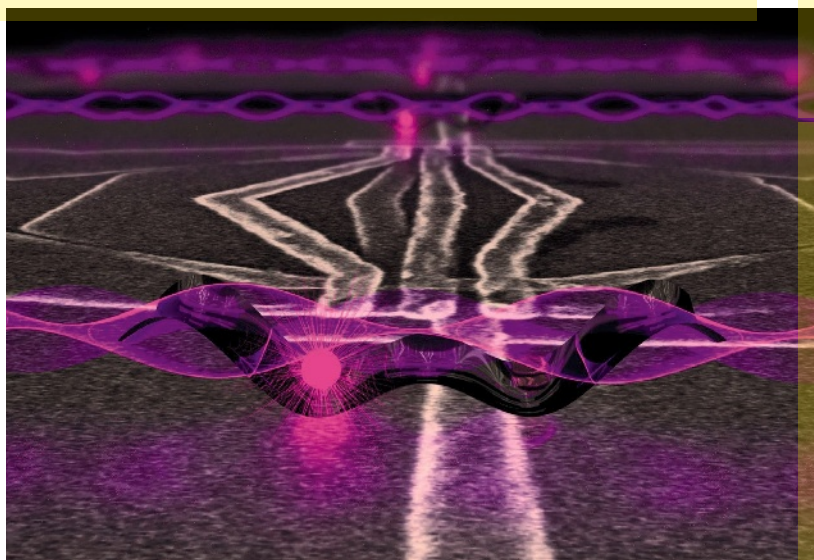
La rapidité d'opération des qubits supraconducteurs résulte de leur taille. Au contraire d'autres systèmes, ils sont formés d'un nombre important de particules élémentaires, les électrons, qui se déplacent sans dissiper d'énergie dans des circuits de plusieurs centaines de microns. La taille des qubits supraconducteurs permet de bien les coupler aux sondes et excitations nécessaires pour les contrôler et autorise un temps de manipulation bien inférieur à la microseconde. À l'origine, les propriétés macroscopiques semblaient rédhibitoires pour élaborer des systèmes très résistants à la décohérence. Cependant, des efforts déployés pour comprendre et améliorer leur isolation vis-à-vis de l'environnement ont rendu les circuits supraconducteurs aussi performants que

- d'autres systèmes fondés sur des particules élémentaires individuelles, par essence plus isolés de l'environnement.

Les travaux ont initialement été menés dans des laboratoires académiques, puis plus récemment dans des laboratoires de recherche et développement de grands groupes industriels ou dans des start-up. C'est d'ailleurs la technologie retenue par Google, prouvant que des manipulations complexes et simultanées sur plusieurs dizaines de qubits supraconducteurs sont désormais possibles. De plus, les



Des atomes neutres seraient de bons qubits si l'on pouvait les contrôler individuellement. C'est le cas dans cette tour Eiffel tridimensionnelle constituée de quelques atomes : un premier pas vers la conception d'ordinateurs quantiques à plusieurs centaines de qubits.



Dans ce qubit en silicium, le spin d'un seul électron (le point rose) a été intriqué à de la lumière (l'onde rose) et resté piégé dans une chambre à double-paroi. La lumière pourrait dans un futur ordinateur quantique transporter l'information concernant le spin de l'électron.

premiers protocoles de correction d'erreurs quantiques ont été mis en œuvre dans de tels systèmes à supraconducteurs.

Ce type de qubit est le système le plus avancé sur le marché des machines quantiques. Il a en outre l'avantage dans la course vers les grands nombres qu'impose la voie du code correcteur d'erreurs, de compter sur des techniques de fabrication bien éprouvées. Cependant, les défis à relever sont nombreux. Ainsi, à courte échéance, les perspectives en termes de fidélité d'opération à plus grande échelle restent une question ouverte et on ignore encore si ces systèmes macroscopiques ne souffriront pas de limites intrinsèques. Ces dernières seraient notamment liées à leur température d'opération qui, à 20 millikelvins, est la plus froide possible. Des contraintes liées à la dissipation d'énergie générée par les signaux de contrôle deviendront de plus en plus importantes à mesure que le nombre de qubits augmentera. À très grande échelle, l'instabilité de ces qubits supraconducteurs sera le principal obstacle à franchir pour espérer les contrôler et les refroidir.

LA VOIE DU NISQ

Dans la voie de l'ordinateur quantique imparfait (le NISQ), la fidélité des opérations sur les qubits est un paramètre important. En effet, moins il y a d'erreurs, plus les systèmes sans correction d'erreurs pourront résoudre des problèmes de calcul avec un nombre moindre de qubits. Le choix se reportera alors sur des qubits fondés sur des particules élémentaires, et plus particulièrement ceux en environnement ultrapropre comme les ions (voir la figure page précédente, en bas) ou les atomes neutres piégés (voir la figure ci-contre en haut) sous vide dans des réseaux optiques. Le record actuel est à 20 atomes piégés intriqués.

La particule élémentaire est un électron de la structure atomique dont l'orientation du spin (un moment cinétique intrinsèque, de nature quantique) constitue l'état quantique que l'on manipule grâce à des lasers. Les ions et les atomes étant isolés dans le vide, ce type de qubit offre les temps de cohérence les plus longs, de l'ordre de plusieurs dizaines de minutes. Ils restent néanmoins contraints par des temps de manipulation assez longs, de l'ordre de la milliseconde pour la plus lente des opérations. Les efforts d'ingénierie portent aujourd'hui sur l'accélération du processeur quantique. Par rapport aux qubits supraconducteurs, les qubits atomiques ont l'avantage de fonctionner à température ambiante. On peut également faire interagir plusieurs qubits à la fois, ce qui ouvre des perspectives en termes d'optimisation des séquences d'opérations quantiques nécessaires pour un calcul.

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 semiconducteurs 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 semiconducteur 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.

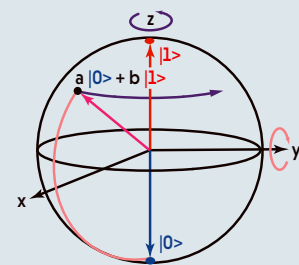
Toutefois, ces avantages méritent d'être renforcés de sorte que l'on puisse aller au-delà de deux qubits, l'état de l'art de cette technologie. ➤

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 %.