



IONS PIÉGÉS

Des ions sont piégés dans un champ électromagnétique. L'état électronique des ions définit le qubit.

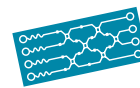
- + Température ambiante
- + Extrême stabilité des qubits
- + Haute fidélité (taux d'erreurs faible)
- Besoin de lasers complexes
- Portes logiques lentes



ATOMES NEUTRES

Un ensemble d'atomes sont piégés grâce à des pinces optiques. Le qubit correspond aux niveaux d'énergie des atomes.

- + Température ambiante
- + Facile à déployer sur un grand nombre d'atomes : idéal pour des simulations quantiques
- Précision limitée des portes logiques
- Besoin de lasers complexes



PHOTONIQUE

Manipulation d'un ensemble de photons. Les qubits sont encodés dans la polarisation des photons.

- + Température ambiante
- + Rapidité de calcul
- Certaines portes logiques (non linéaires) sont difficiles à réaliser
- Pertes de photons à corriger

Existe-t-il d'autres façons de définir le qubit supraconducteur ?

Les qubits «de chats» (dont le nom s'inspire directement de l'expérience du chat de Schrödinger) et les qubits GKP (du nom de ses inventeurs, Daniel Gottesman, Andrei Kitaev et John Preskill) sont d'autres solutions plus astucieuses. Au lieu de regarder la pluralité des niveaux et le phénomène de fuite comme un problème, on essaie de profiter de cette liberté supplémentaire pour obtenir un encodage plus robuste.

Les qubits de chats exploitent la pluralité de niveaux pour encoder l'information dans un état complexe extrêmement robuste à une des deux erreurs quantiques. Plus précisément, on sait stabiliser une certaine superposition de niveaux d'énergies dans laquelle la probabilité d'avoir un retournement de bit est exponentiellement réduite. Il est alors possible de supprimer presque entièrement cette première source d'erreur quantique et de n'utiliser un code correcteur que pour la seconde, ce qui réduit drastiquement l'*overhead*.

Les qubits de chats, dans leur incarnation moderne, sont le fruit d'une collaboration entre l'équipe Quantic de Mazyar Mirrahimi (Inria, Mines, ENS) et celle de Michel Devoret et Rob Schoelkopf (Yale). Leur développement est plus récent que celui des transmons, et on est encore loin d'être capable de faire un processeur contenant une cinquantaine de tels qubits. En février 2020, un énorme coup d'accélérateur a été donné avec la création de la

start-up Alice&Bob, dont l'objectif est d'effectuer un changement d'échelle de ces qubits, en s'inspirant des prototypes prometteurs de Quantic (réalisés par le groupe de Zaki Leghtas, dans les laboratoires de l'ENS) pour passer à plusieurs dizaines de qubits. L'entreprise bénéficie de moyens importants (elle a levé 27 millions d'euros) et compte des jeunes chercheurs de premier plan comme Jérémie Guillaud (qui a analysé les codes correcteurs pour les qubits de chats lorsqu'il était en thèse à Quantic avec Mazyar Mirrahimi). La concurrence sera rude, car Amazon, qui est entré tardivement dans la course à l'ordinateur quantique, a aussi récemment choisi cette approche.

Les qubits GKP poussent l'idée encore plus loin en utilisant la pluralité des niveaux d'énergie pour obtenir une protection simultanée contre les deux types d'erreurs quantiques. C'est une notion théorique ancienne (2001), très séduisante sur le papier, mais beaucoup plus difficile à implémenter. Sur ce front, l'équipe Quantic travaille principalement à des protocoles plus simples pour réaliser et stabiliser ces qubits. L'effort expérimental du groupe est mené par Philippe Campagne-Ibarcq, qui a contribué à la première réalisation de ce type de qubits supraconducteurs lorsqu'il était dans le groupe de Michel Devoret à Yale. Côté théorique, il y a aussi d'énormes défis, car ces qubits sont difficiles à simuler, ce qui complique la conception des circuits. Pour le moment, la recherche sur les qubits GKP est purement académique.

Quelles sont les pistes en dehors des supraconducteurs ?

Il en existe plusieurs. Les ions piégés sont l'alternative la plus avancée. Ces systèmes ont l'avantage d'avoir des qubits très propres, mais le passage à l'échelle n'est pas évident. Les ions sont suspendus dans le vide grâce à des champs électromagnétiques et manipulés avec des



Les spins dans le silicium pourraient bénéficier d'un effet de rupture technologique

lasers. Il est très compliqué de positionner au bon endroit tous les ions, qui sont disposés en ligne. La société Honeywell explore des configurations en deux dimensions, plus compactes, mais la question de l'alignement est d'autant plus difficile.

Une autre approche utilise des spins dans le silicium. L'institut de recherche QuTech associé à l'université de Delft, aux Pays-Bas, et les équipes du CEA de Grenoble explorent cette approche. Un des gros problèmes est la sensibilité aux impuretés parasites, qui rendent aujourd'hui très difficile de combiner un grand nombre de qubits et des portes logiques de qualité acceptable. L'aspect séduisant de cette approche est que si ces premiers obstacles non négligeables sont dépassés, on peut espérer une mise à l'échelle rapide. En effet, cette filière s'appuie sur l'investissement financier massif et le savoir-faire que l'industrie a engagés dans le développement des semi-conducteurs pour les ordinateurs classiques.

Cette dynamique de rupture est *a priori* assez différente de celle des qubits supraconducteurs, où on imagine une évolution plus linéaire et progressive vers l'ordinateur quantique universel.

Un autre secteur qui pourrait créer la surprise est celui des qubits photoniques. L'information est portée par des photons qui traversent un circuit avec des miroirs semi-réfléchissants, des polariseurs, etc. Dans ce domaine on espère aussi une dynamique de rupture. On pense que si on arrive à fabriquer un ordinateur contenant une poignée de qubits, alors il sera comparativement facile de changer d'échelle et d'en faire des millions. Un des obstacles de cette approche est qu'il n'est

pas facile de réaliser certaines portes logiques, qui demandent des phénomènes non linéaires, où les photons interagissent entre eux. La raison est physique, deux photons ne peuvent pas interagir directement avec la force électromagnétique. On peut obtenir de la non-linéarité en utilisant de la matière comme intermédiaire, mais ces non-linéarités sont généralement trop faibles pour fabriquer des portes logiques rapides.

Où en sont les développements des qubits photoniques ?

Une solution a été proposée en 2001 par les physiciens Emanuel Knill, Raymond Laflamme, et Gerard Milburn. L'idée est d'exploiter la non-linéarité de la mesure quantique pour synthétiser des portes logiques à partir de portes linéaires. On introduit des photons auxiliaires, qui sont mélangés aux autres photons, puis interceptés en cours de route. On ajuste les opérations linéaires sur les photons restants en fonction des résultats de mesure sur les photons auxiliaires. Il faut être rapide, bien synchronisé, car pendant ce temps de décision, les photons se déplacent à la vitesse de la lumière. L'*overhead* en termes de photons auxiliaires sacrifiés est très élevé avec l'approche originelle. La société PsiQuantum, qui explore cette voie, a levé plus de 600 millions de dollars et a publié quelques pistes théoriques d'amélioration. Mais très peu d'information filtre sur leur état d'avancement réel.

Comment voyez-vous l'évolution du domaine dans les années à venir ?

Je suis assez sceptique sur le fait qu'on réussira à trouver une réelle utilité aux NISQ, c'est-à-dire aux ordinateurs quantiques se voulant universels mais à profondeur limitée par les erreurs. À court terme, il vaut probablement mieux regarder du côté des simulateurs non universels avec un très grand nombre de qubits, qui pourraient être intéressants pour simuler des matériaux quantiques et servir de bancs de test pour les meilleurs codes de simulation classique. À plus long terme, je pense que si on réussit à faire un ordinateur quantique universel utile (ce qui n'est pas garanti), ce sera avec des qubits au moins partiellement protégés, permettant une correction d'erreur avec un *overhead* raisonnable. Si ces ordinateurs quantiques universels arrivent dans moins de dix ans, ce qui est très improbable, c'est qu'une des approches de rupture comme le silicium ou les qubits photoniques aura miraculeusement fonctionné. Si la progression est plus linéaire, et que les ions piégés et les qubits supraconducteurs restent les meilleures plateformes, comme on s'y attend, les délais pourraient être bien plus longs... ■

Propos recueillis par Sean Bailly

BIBLIOGRAPHIE

S. G. J. Philips et al., **Universal control of a six-qubit quantum processor in silicon**, prépublication arXiv, 2022.

P. Campagne-Ibarcq et al., **Quantum error correction of a qubit encoded in grid states of an oscillator**, *Nature*, 2020.

F. Arute et al., **Quantum supremacy using a programmable superconducting processor**, *Nature*, 2019.

M. Mirrahimi et al., **Dynamically protected cat-qubits : A new paradigm for universal quantum computation**, *New Journal of Physics*, 2014.

D. Gottesman et al., **Encoding a qubit in an oscillator**, *Physical Review A*, 2001.