

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

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 originale. 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

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

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.