

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 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

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.

L'ESSENTIEL

> Pour corriger les erreurs qui surviennent dans les ordinateurs quantiques, les codes correcteurs classiques sont inutilisables.

> Les spécialistes ont développé des stratégies qui nécessitent d'ajouter des qubits. On distingue alors les qubits logiques (qui portent l'information) de l'ensemble des qubits physiques.

> Pour réaliser des opérations sur les qubits, ces derniers sont manipulés par des « portes logiques », qui introduisent aussi des erreurs.

> Il faut trouver un compromis entre le nombre de qubits à utiliser et la quantité d'erreurs que l'on veut maîtriser.

L'AUTRICE



ZAIRA NAZARIO
physicienne
théoricienne au
centre de recherche
IBM Watson,
aux États-Unis

Calculer plus vite... et sans erreurs?

Les lois de la physique qui rendent les ordinateurs quantiques si puissants sont aussi à la source de leur grande fragilité. Des techniques toujours plus performantes sont indispensables pour corriger les erreurs plus rapidement qu'elles ne s'accumulent.



Il existe un principe en physique quantique qui stipule que tout ce qui n'est pas interdit doit se produire (mais peut-être avec une probabilité ridiculement petite). Les erreurs sont donc une fatalité dans tous les domaines. On en retrouve dans le langage, la cuisine, la communication, le traitement des images et, bien sûr, le calcul. Pour que la société fonctionne correctement malgré ces erreurs, il est par conséquent indispensable de les contrôler et de les corriger. De nombreuses méthodes ont été développées, et ainsi un DVD rayé reste lisible, un QR code chiffonné est toujours déchiffirable; les sondes spatiales transmettent des clichés de planètes lointaines sur des centaines de millions de kilomètres et le signal

Actuellement, les meilleures machines commettent une erreur toutes les 1000 portes

n'en demeure pas moins net. La correction des erreurs est l'un des outils les plus essentiels des technologies de l'information. Les erreurs sont peut-être inéluctables, mais elles sont aussi réparables.

Cette loi de l'inévitabilité touche également les ordinateurs quantiques. Ces machines exploitent les règles fondamentales de la physique pour résoudre des problèmes que les ordinateurs classiques ne parviennent pas à résoudre de façon efficace. Ces dispositifs ont connu un intense développement ces dernières années et auront certainement un impact très fort sur la science et l'industrie de demain. Mais cette grande puissance s'accompagne d'une grande vulnérabilité. Les ordinateurs quantiques souffrent en effet d'erreurs que les techniques de correction standard ne sont pas en mesure de traiter.

Au début de ma carrière, en tant que physicienne théoricienne de la matière condensée, je me suis intéressée à certains comportements quantiques dans les matériaux. J'ai notamment étudié la supraconductivité, un phénomène associé à certains matériaux refroidis à une température proche du zéro absolu dans lesquels la résistance électrique devient nulle. À l'époque, mes préoccupations

étaient bien éloignées de celles des ordinateurs quantiques.

Ces derniers en étaient alors encore à leurs balbutiements. Paul Benioff, du laboratoire américain Argonne, en avait proposé le principe en 1980, mais les premiers prototypes ont été construits près de vingt ans plus tard. En 2007, une découverte a eu un rôle clé dans le développement du domaine. Robert Schoelkopf, Michel Devoret et leurs collègues de l'université Yale ont mis au point une technique reposant sur la supraconductivité pour concevoir des ordinateurs quantiques. De nombreuses entreprises (IBM, Google, etc.) ont vite adopté cette approche pour créer leurs propres ordinateurs quantiques. Forte de mon expérience en matière de supraconductivité, j'ai rejoint IBM où je me suis consacrée à l'amélioration des opérations entre plusieurs qubits reliés entre eux et à l'étude des moyens de corriger les erreurs.

Le qubit est la version quantique du bit d'information classique qui prend la valeur «0» ou «1». Le qubit exploite un phénomène quantique, la superposition des états: il est une combinaison de l'état «0» et de l'état «1». En associant des qubits grâce à l'intrication quantique (voir l'encadré page 33), nous pouvons manipuler collectivement de plus grandes quantités d'information qu'un nombre équivalent de bits classiques. À cause de leur nature quantique, les qubits se comportent comme des ondes, qui interfèrent à la manière des ondes lumineuses. Ces interférences conduisent à des capacités de calcul bien plus riches que les simples inversions de bits classiques. Pour ces raisons, les spécialistes pensent que l'ordinateur quantique devrait effectuer certaines tâches bien plus efficacement qu'un ordinateur classique. Entre autres, la simulation de systèmes quantiques réels, la conception et l'analyse de nouveaux matériaux, la découverte de motifs cachés dans de vastes bases de données pour améliorer l'apprentissage automatique, ou la recherche de catalyseurs plus performants sur le plan énergétique pour les processus chimiques industriels.

DIMINUER LE NOMBRE DES ERREURS

Le souci est que de nombreuses propositions visant à résoudre des problèmes utiles exigent que les ordinateurs quantiques effectuent des milliards d'opérations logiques (mises en œuvre électroniquement par ce qu'on nomme des «portes logiques») sur des centaines ou des milliers de qubits. Pour réaliser une telle prouesse, cela exige du système qu'il fasse au maximum une seule erreur par milliard de portes. Or, actuellement, les meilleures machines commettent une erreur toutes les 1000 portes. Face à l'écart considérable