

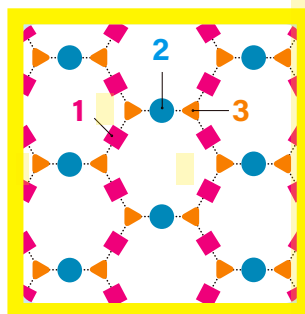
La théorie qui sous-tend les codes de surface est convaincante, mais lorsque nous avons commencé à les mettre en application chez IBM, nous avons rencontré des difficultés. Pour comprendre ces obstacles, il faut d'abord préciser le fonctionnement des qubits que nous utilisons. Il s'agit de transmons, un type de qubits supraconducteurs, qui reposent sur des courants électriques qui oscillent dans un circuit de matériaux supraconducteurs. Le qubit est défini par la superposition des états «0» et «1», correspondant à différentes charges électriques du circuit. Pour effectuer des opérations sur un qubit, nous émettons des impulsions d'énergie à une fréquence microonde spécifique. Lors de sa conception, chaque qubit est réglé pour être réceptif à une fréquence donnée, de sorte à pouvoir atteindre individuellement chaque qubit sans perturber ses voisins. Mais le système n'est pas parfait : la fréquence s'écarte parfois de la valeur prévue ; les gammes de fréquences des impulsions se chevauchent de sorte qu'un signal destiné à un qubit modifie de temps en temps la valeur d'un qubit voisin (on parle de diaphonie ou de *cross-talk*). La forte densité de la grille du code de surface, où chaque qubit est connecté à quatre autres qubits, provoque un trop grand nombre de ces collisions de fréquences.

DES ÉCHIQUEURS AUX COLONS DE CATAN

Pour résoudre ce problème, notre équipe a décidé de connecter chaque qubit à un nombre plus faible de voisins. **Le résultat est un réseau hexagonal qui ressemble plus à la configuration du jeu de plateau Catan** qu'à un plateau d'échecs. Ce système réduit efficacement le *cross-talk*. Mais avec cette nouvelle configuration physique, l'équipe des théoriciens d'IBM a dû développer le code correcteur correspondant.

Ce nouveau code, nommé «code hexagonal lourd», combine certaines caractéristiques du code de surface et d'un autre, le code Bacon-Shor, également conçu pour les réseaux bidimensionnels. La connectivité plus faible des qubits dans notre code signifie que certains qubits doivent servir d'intermédiaires pour identifier les erreurs qui se sont produites, ce qui conduit à des circuits légèrement plus complexes et donc à un seuil où le bruit n'est plus contrôlé un peu plus faible. Nous avons constaté que le compromis entre une diminution du *cross-talk* et un seuil moins bon était satisfaisant.

Il reste un autre problème à résoudre. Les codes qui vivent sur des plans bidimensionnels et qui n'intègrent que les connexions entre voisins les plus proches ont besoin de beaucoup de qubits physiques pour définir un seul qubit logique (ce rapport est désigné par le terme anglais d'*overhead*). Le qubit logique correspond



1. Qubit de donnée

2. Qubit auxiliaire

3. Qubit de signalisation

à lire



THEMA L'ordinateur quantique

Fabrication des qubits, techniques de calcul, cryptographie, simulation et mémoires quantiques : dix articles pour faire le point sur l'ordinateur de demain.

En vente sur notre site uniquement :
<https://rebrand.ly/Thema>

à l'unité d'information intéressante que l'on veut protéger contre les erreurs et les qubits physiques sont les éléments matériels qui opèrent ensemble pour définir le qubit logique et pour garantir qu'il ne contient pas d'erreur. Pour corriger davantage d'erreurs, il faut construire un code plus grand, qui utilise encore plus de qubits physiques pour créer un seul qubit logique. Il est donc nécessaire de manipuler plus de composants physiques pour au final traiter la même quantité de données. Mais l'ajout de matériel rend d'autant plus difficile la maîtrise de qubits de bonne qualité pour ne pas dépasser le seuil d'erreurs.

Les ingénieurs quantiques ont deux options. Première piste, ils acceptent ce large *overhead* – avec un nombre élevé de qubits et de portes logiques – comme le prix à payer pour garder une architecture simple. Et ils s'échinent à comprendre et optimiser les différents facteurs qui y contribuent. Ou alors, ils cherchent un code plus efficace. Par exemple, pour coder plus de qubits logiques à partir d'un nombre plus réduit de qubits physiques, une solution serait de faire interagir des qubits plus éloignés les uns des autres. Pour dépasser la limite du contact aux seuls voisins les plus proches dans le réseau à deux dimensions, il faudrait considérer des réseaux à trois dimensions, ou plus. Notre équipe explore les deux stratégies.

Un ordinateur quantique ne sera vraiment utile que lorsqu'il sera en mesure d'effectuer toutes les opérations de calcul possibles. On oublie souvent ce critère d'universalité, ce qui conduit à de nombreuses confusions sur l'informatique quantique. En d'autres termes, tous les dispositifs que les gens nomment «ordinateurs» quantiques ne sont pas vraiment des ordinateurs. La plupart s'apparentent davantage à des machines à calculer capables de réaliser un nombre limité de tâches.

Le fait de négliger la nécessité d'un calcul universel est également à l'origine de faux espoirs concernant les qubits logiques et la correction d'erreurs. Protéger les informations en mémoire contre les erreurs est un début, mais cela ne résout pas tous les problèmes. Pour obtenir un ordinateur quantique universel, il faut savoir construire un certain nombre de portes logiques différentes. Combinées entre elles, elles sont susceptibles de réaliser toutes les opérations logiques imaginables. Mais ces portes doivent, elles aussi, être robustes contre les erreurs. C'est là que les choses se compliquent.

Certaines portes, appartenant à la catégorie des portes dites «transverses», sont relativement robustes. Quand vous appliquez l'opération d'une porte logique transverse sur un qubit logique, vous devez appliquer cette même opération à chacun des qubits physiques associés. Quand une telle porte opère entre

deux qubits logiques (A et B), de la même façon, vous menez l'opération entre les qubits physiques correspondants des qubits logiques A et B: le qubit 1 de A avec le qubit 1 de B, le qubit 2 de A avec le qubit 2 de B, etc. Comme cette porte limite les interactions entre les qubits physiques, les erreurs se propagent peu et restent sous contrôle.

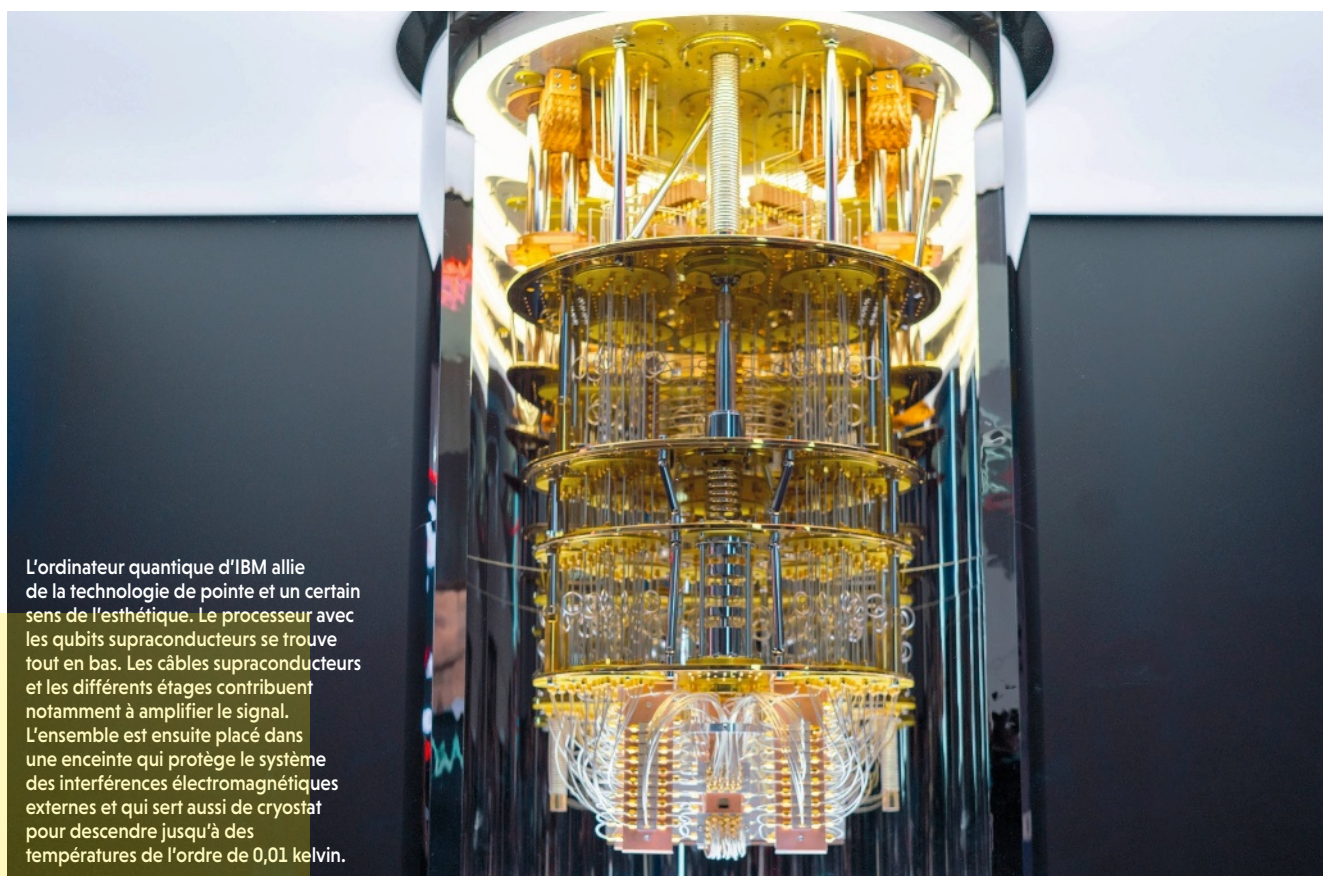
Si toutes les portes nécessaires pour construire un jeu universel de portes étaient transverses, la vie serait simple. Mais, en 2008, Bryan Eastin et Emanuel Knill, de l'institut américain des standards et des technologies, ont montré dans un théorème fondamental qu'aucun code quantique ne peut effectuer un calcul universel en utilisant uniquement des portes transverses.

Cela nous dit quelque chose d'important sur les ordinateurs quantiques. Si vous entendez quelqu'un dire que la particularité de l'informatique quantique réside dans la superposition et l'intrication, méfiez-vous ! Tous les états de superposition et d'intrication ne sont pas spéciaux. Certains sont mis en œuvre par un groupe de portes transverses que nous appelons le «groupe de Clifford». Un ordinateur classique peut simuler efficacement des calculs quantiques qui n'utilisent que des portes de Clifford (porte de Hadamard, porte

d'inversion contrôlée ou porte de changement de phase, voir l'encadré pages 34-35). En revanche avec des portes qui n'appartiennent pas au groupe de Clifford, la simulation classique sera très difficile. Mais ces portes ont tendance à ne pas être transverses et donc à avoir une mauvaise fidélité (c'est-à-dire qu'elles ont une probabilité élevée d'introduire des erreurs).

COMMENT FAIRE SANS LES PORTES NON-CLIFFORD ?

La meilleure astuce dont nous disposons pour mettre en œuvre des portes non-Clifford protégées du bruit se nomme la distillation d'états magiques. Cette technique a été proposée en 2004 par Emanuel Knill puis par Andrei Kitaev et Sergey Bravyi. Vous pouvez implémenter des portes non-Clifford en utilisant uniquement des portes Clifford si vous avez accès à des états quantiques dits «magiques» (correspondant à une superposition particulière des états «0» et «1»). Ces états magiques doivent toutefois être très purs, c'est-à-dire comporter très peu d'erreurs. Andrei Kitaev et Sergey Bravyi ont montré que, dans certains cas, il est possible de partir d'une collection d'états magiques bruités et de les distiller, en employant exclusivement des portes de



L'ordinateur quantique d'IBM allie de la technologie de pointe et un certain sens de l'esthétique. Le processeur avec les qubits supraconducteurs se trouve tout en bas. Les câbles supraconducteurs et les différents étages contribuent notamment à amplifier le signal. L'ensemble est ensuite placé dans une enceinte qui protège le système des interférences électromagnétiques externes et qui sert aussi de cryostat pour descendre jusqu'à des températures de l'ordre de 0,01 kelvin.