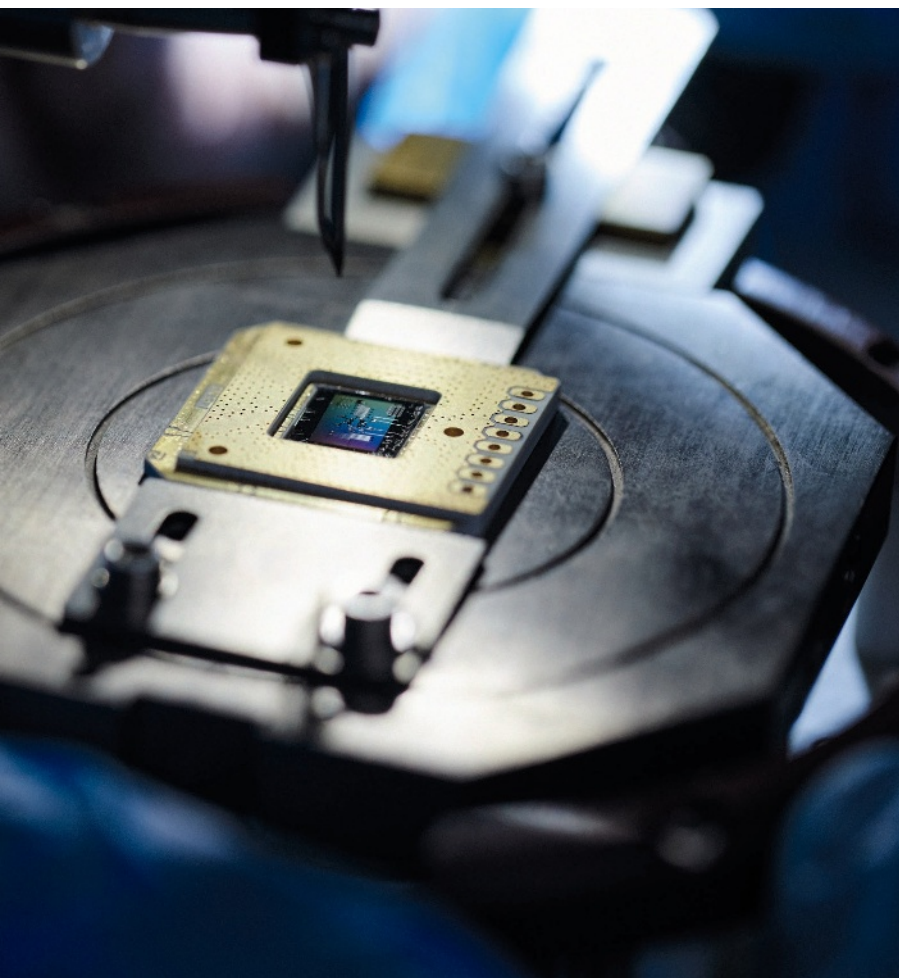




En théorie, on est capable d'améliorer la résistance à toutes les erreurs quantiques à partir de 5 qubits physiques d'assez bonne qualité par qubit logique. En pratique, on ne veut pas juste réduire la probabilité d'erreur, mais rendre les erreurs presque impossibles alors même qu'elles sont encore trop fréquentes au niveau physique. Cela demande des *overheads* beaucoup plus importants, typiquement de l'ordre de 1000 à 10000 qubits physiques bruités par qubit logique. Cette valeur est énorme, car il faut ensuite plusieurs milliers de qubits logiques pour faire tourner des algorithmes intéressants comme celui de Shor.

Y a-t-il des moyens de diminuer le nombre de qubits ?

Avec les machines actuelles, dans l'ère du NISQ, on ne fait simplement pas de correction d'erreur, pour garder un nombre raisonnable de qubits utiles. On se contente d'une profondeur faible où la probabilité d'erreur globale reste acceptable.

Une des grandes questions théoriques est de savoir s'il est possible de faire des calculs utiles avec ces machines NISQ à profondeur

limitée. On est raisonnablement confiant sur le fait que les calculs effectués par ces machines sont difficiles ou impossibles pour les ordinateurs classiques (ou en tout cas le seront bientôt) et donc que ces machines sont, en un certain sens, puissantes. Mais on ne sait rien faire d'utile avec. Ça n'enlève rien à l'exploit technologique que représentent les processeurs américains et chinois. Mais il est fort probable que nous ayons atteint les limites de cette approche.

Pour aller plus loin et arriver à des ordinateurs universels capables de mener des calculs utiles, il va falloir réduire les erreurs d'un facteur au moins 1 milliard. Les codes correcteurs d'erreurs deviennent alors indispensables.

Mais comment ne pas faire exploser l'« overhead » ?

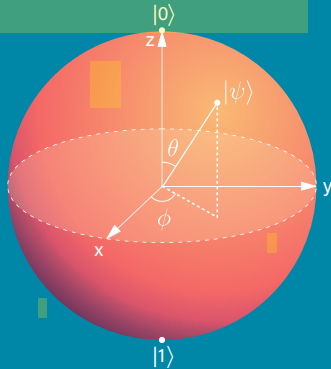
Il existe différentes stratégies. On peut d'abord essayer de perfectionner davantage les codes correcteurs, mais il est peu probable qu'il y ait encore beaucoup à gagner sur ce front. La stratégie qui me semble la plus pertinente sur le long terme consiste à améliorer les supports physiques des qubits. L'idée est de produire des qubits le plus « propres » possible, les plus résistants à certaines formes de bruit grâce à des stratégies de correction passives. Cela n'éliminera jamais totalement les erreurs. Il faudra toujours utiliser des codes quantiques, mais de façon moins massive, et donc avec un *overhead* limité.

Quels sont les différents supports physiques de qubits à l'étude actuellement ?

Pour l'implémentation des qubits physiques, les qubits supraconducteurs sont probablement la technologie la plus mature. De nombreuses équipes ont contribué à leur développement, mais on peut signaler en particulier les travaux précurseurs dans les années 1990 et 2000 de Yasunobu Nakamura, à l'université de Tokyo, et des Français Daniel Esteve et Michel Devoret du CEA-Saclay, ce dernier étant désormais à la tête d'une des toutes meilleures équipes du domaine à l'université Yale.

Pour concevoir un qubit, l'idée la plus simple est de prendre un degré de liberté auquel on peut associer les valeurs « 0 » ou « 1 » et qui est déjà élémentaire, par exemple le spin d'une particule. Au contraire, dans les supraconducteurs, on associe les valeurs « 0 » ou « 1 » à un grand nombre de degrés de liberté microscopiques, correspondant à des paires d'électrons qui circulent dans une boucle supraconductrice dotée d'une jonction Josephson (un élément isolant séparant deux supraconducteurs est traversé par un courant électrique par effet tunnel, c'est l'effet Josephson). Le courant dans le système supraconducteur peut se trouver dans différents

LES PRINCIPALES TECHNIQUES DE RÉALISATION PHYSIQUE D'UN QUBIT



Représentation d'un qubit d'état quantique $|\psi\rangle$ et de ses deux niveaux $|0\rangle$ et $|1\rangle$.



SUPRACONDUCTEUR

Le qubit est encodé par le courant électrique dans une boucle supraconductrice contenant une jonction Josephson.

- + Technique mature
- + Rapidité de calcul
- Forte instabilité des qubits
- Fragilité élevée



SPIN DANS LE SILICIUM

Le qubit est porté par le spin d'un électron piégé dans une boîte quantique (*quantum dot*).

- + S'appuie sur les technologies industrielles des semi-conducteurs
- + Stabilité des qubits
- Extrême pureté du substrat de silicium
- Difficulté à intriquer de nombreux qubits

Pour limiter l'«overhead», il faut des qubits le plus «propres» possible

états, avec différents niveaux d'énergie, que l'on utilise pour définir le qubit.

Un avantage de cette approche est que ce support du qubit ressemble à un circuit électrique usuel, ainsi toute l'électronique de contrôle autour du qubit est relativement standard. La fabrication du circuit électrique bénéficie aussi des progrès en microfabrication. Le passage de quelques qubits à plusieurs milliers, bien que techniquement difficile, ne semble pas insurmontable d'un point de vue physique. Enfin, les qubits supraconducteurs permettent de faire des portes logiques extrêmement rapides, ce qui compense le fait que les erreurs arrivent aussi rapidement. Pour ces raisons, de nombreux laboratoires et industriels, dont Google et IBM, mais aussi l'équipe Quantic, dans laquelle je travaille, ont choisi ce type de support physique.

Une difficulté *a priori* des circuits supraconducteurs est que pour descendre un système aussi gros (constitué de centaines de milliards d'atomes) dans le domaine quantique, il faut le refroidir à des niveaux extrêmes, de l'ordre de quelques dizaines de millikelvins. Heureusement, depuis quelques années, des systèmes de cryogénie atteignant ces températures sont disponibles dans le commerce.

Comment le qubit est-il encodé dans les supraconducteurs ?

Ce qui est intéressant, c'est qu'il existe plein de façons de le faire. La plus classique est le transmon, qui a été développé à l'université Yale en 2007 et qui est une amélioration des «boîtes à paires de Copper», développées au CEA-Saclay dans les années 2000. Pour simplifier, les deux états «0» et «1» des qubits sont obtenus à partir des deux niveaux de plus basse énergie d'un circuit supraconducteur. Ils correspondent approximativement à la situation où une unité élémentaire de courant circule, ou aucune. C'est une idée désormais assez simple à mettre en œuvre, mais qui pose un problème évident. Rien n'empêche strictement le système de se retrouver dans un niveau d'énergie plus élevé, correspondant à davantage de courant dans le circuit. Le qubit fuit alors hors des états 0 ou 1 vers des états où on ne le contrôle plus, ce qui entraîne une erreur qu'il n'est pas possible de corriger (c'est le problème de *leakage*).



IONS PIÉGÉS

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

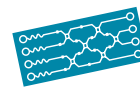
- + Température ambiante
- + Extrême stabilité des qubits
- + Haute fidélité (taux d'erreurs faible)
- Besoin de lasers complexes
- Portes logiques lentes



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.