

> À cette superposition s'ajoute une autre propriété essentielle des potentiels ordinateurs quantiques, l'intrication, un phénomène par lequel les états quantiques de deux entités, ou plus, comme des qubits, sont corrélés et donc dépendants les uns des autres (voir *Pas d'échappatoire pour l'intrication*, par R. Hanson, page 26). Intrication et superposition autorisent un parallélisme massif dans le traitement de l'information, la clé de la puissance de l'ordinateur quantique. Il y a toutefois un problème : la décohérence. Les interactions avec l'environnement font perdre ses propriétés à un système quantique, et ce d'autant plus qu'il contient de qubits. C'est contre elle que la course à l'ordinateur quantique est engagée depuis une vingtaine d'années. En résumé, la réalisation d'un ordinateur quantique repose sur le contrôle d'états intriqués s'étalant sur un nombre important de qubits et sur la préservation de la cohérence de tels états le plus longtemps possible.

Aujourd'hui, le nombre maximal de qubits contrôlés est, nous l'avons vu, de l'ordre de la cinquantaine et le nombre d'opérations quantiques réalisées est du même ordre. C'est suffisant pour d'ores et déjà explorer un grand espace des états possibles à la limite de ce qu'il est possible de simuler sur les meilleurs supercalculateurs classiques. Les courbes de performance se croisent et les recherches sur la conception de qubits sont intenses. De nombreux candidats ont été testés : atomes, ions, molécules, électrons, photons, circuits supraconducteurs. Parmi eux, lesquels offrent les perspectives les plus intéressantes ?

DEUX TYPES D'ORDINATEURS

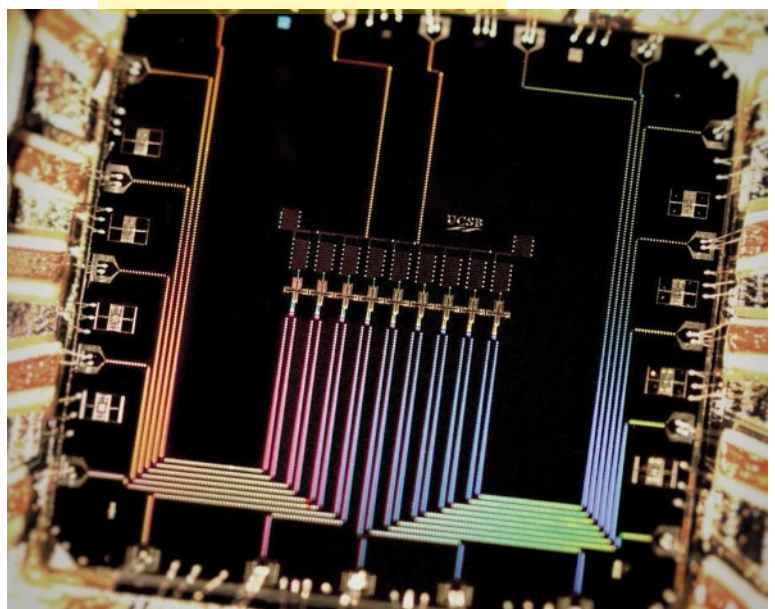
Pour répondre, il convient de distinguer deux types de machines quantiques : celles dotées de processeurs quantiques nécessitant des codes correcteurs d'erreurs et celles pour lesquelles le calcul est possible même avec un faible taux d'erreurs (voir *l'entretien avec A. Aspect*, page 10). Dans le premier cas, on parle de LSQ, pour *large scale quantum computers*, pour lesquels on cherche à pallier les erreurs liées à la décohérence, mais les chercheurs ont montré qu'il faudrait pour ce faire 1 000, voire 10 000 qubits physiques pour chaque qubit utilisable pour les calculs ! Un effort important est donc nécessaire pour résoudre le problème de contrôle posé par des processeurs quantiques à grand nombre de qubits.

Dans le second cas, on parle de NISQ, pour *noisy intermediate scale quantum computers*, c'est-à-dire des ordinateurs quantiques imparfaits de taille intermédiaire. Cette fois, la priorité sera une compréhension plus poussée des conditions de fonctionnement des qubits pour diminuer les erreurs lors des opérations quantiques.

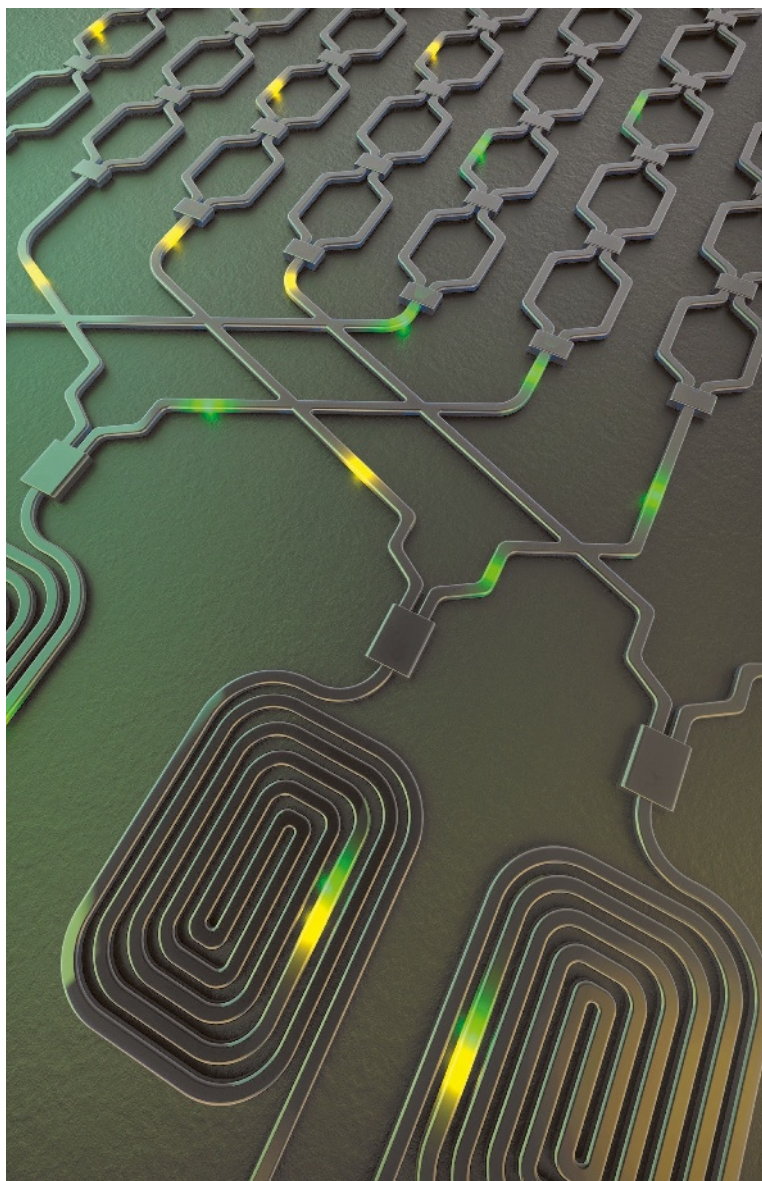
Ces deux approches sont complémentaires et s'autoalimentent à mesure du développement des processeurs quantiques. Elles réclament toutes les deux un effort pluridisciplinaire combinant les sciences physiques, technologiques et informatiques. La diversité des perspectives de calcul suppose des prérequis différents au niveau des plateformes expérimentales, ce qui pourrait conduire à reconsidérer la notion selon laquelle une seule plateforme pourrait être universelle. Pour y voir plus clair, dressons un panorama des différentes plateformes en course, leurs forces et leurs limites, afin de comprendre pour quel type de calcul elles pourraient avoir un rôle à jouer à plus ou moins long terme.

L'élaboration d'un ordinateur quantique impose de lire individuellement les qubits, de les contrôler ainsi que leur interaction, dans un dispositif potentiellement intégrable à plus grande échelle. Parmi les innombrables

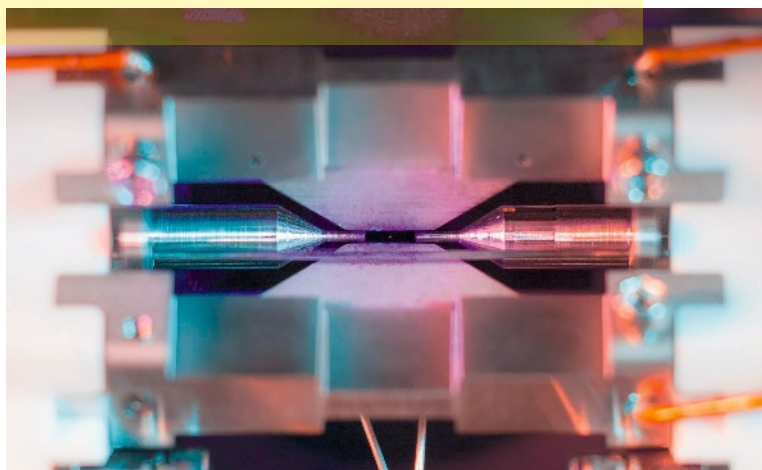
INTRICATION ET SUPERPOSITION AUTORISENT UN PARALLÉLISME MASSIF DANS LE TRAITEMENT DE L'INFORMATION



Un circuit supraconducteur abrite en son centre neuf qubits.



Des qubits sous la forme de photons sont créés dans les spirales puis guidés le long de pistes en silicium pour effectuer différentes tâches.



Un ion de strontium (le petit point au centre, la fluorescence apparaît après un temps de pose de 30 secondes) a été piégé dans une enceinte ultravide entre deux électrodes. De tels ions piégés pourraient constituer des qubits.

systèmes issus de la physique ou de la chimie et gouvernés par des propriétés quantiques, ceux ayant atteint ces objectifs avec une précision suffisante sont rares, et c'est à eux que nous nous intéresserons ici. Précisons que cette sélection n'est valable qu'à un instant donné, aujourd'hui, et reste tributaire de nos connaissances, encore en construction, sur l'ordinateur quantique et de notre capacité à contrôler les systèmes quantiques. Le même exercice dans quelques années pourrait conduire à une liste différente.

Les qubits retenus se distinguent notablement en termes de performances et de géométrie, autant de caractéristiques liées à des paramètres physiques et technologiques, comme la vitesse et la robustesse des opérations quantiques, la taille effective du qubit, la variabilité des paramètres de fonctionnement du qubit... (voir le tableau page 84) et aucun n'est pour le moment incontournable au vu des contraintes de l'ordinateur quantique.

LA VOIE DU SUPRACONDUCTEUR

La vitesse d'opération est clairement importante, car elle détermine la rapidité du processeur quantique. Si elle devient le facteur clé, alors le choix le plus judicieux est clair aujourd'hui : miser sur les qubits de type supraconducteur (voir la figure page ci-contre), c'est-à-dire dépourvu de résistance électrique à basse température. L'étude de ces objets a commencé il y a plus de quarante ans lorsque diverses expériences ont montré le comportement globalement quantique du circuit supraconducteur le plus simple : la jonction Josephson. Cet élément est constitué de deux électrodes supraconductrices séparées par un mince isolant électrique que peuvent traverser, par effet tunnel, des paires d'électrons (dites «de Cooper»). Refroidis à des températures d'environ 20 millikelvins, les circuits à jonction Josephson se comportent comme des atomes artificiels à deux états possibles, le prérequis pour être un qubit.

La rapidité d'opération des qubits supraconducteurs résulte de leur taille. Au contraire d'autres systèmes, ils sont formés d'un nombre important de particules élémentaires, les électrons, qui se déplacent sans dissiper d'énergie dans des circuits de plusieurs centaines de microns. La taille des qubits supraconducteurs permet de bien les coupler aux sondes et excitations nécessaires pour les contrôler et autorise un temps de manipulation bien inférieur à la microseconde. À l'origine, les propriétés macroscopiques semblaient rédhibitoires pour élaborer des systèmes très résistants à la décohérence. Cependant, des efforts déployés pour comprendre et améliorer leur isolation vis-à-vis de l'environnement ont rendu les circuits supraconducteurs aussi performants que