



« Aurélie Jean, l'étoile scientifique qui monte. »

Guillaume Grallet, *Le Point*

« Aussi bien autobiographie
qu'essai scientifique et social,
ce livre m'a passionné. »

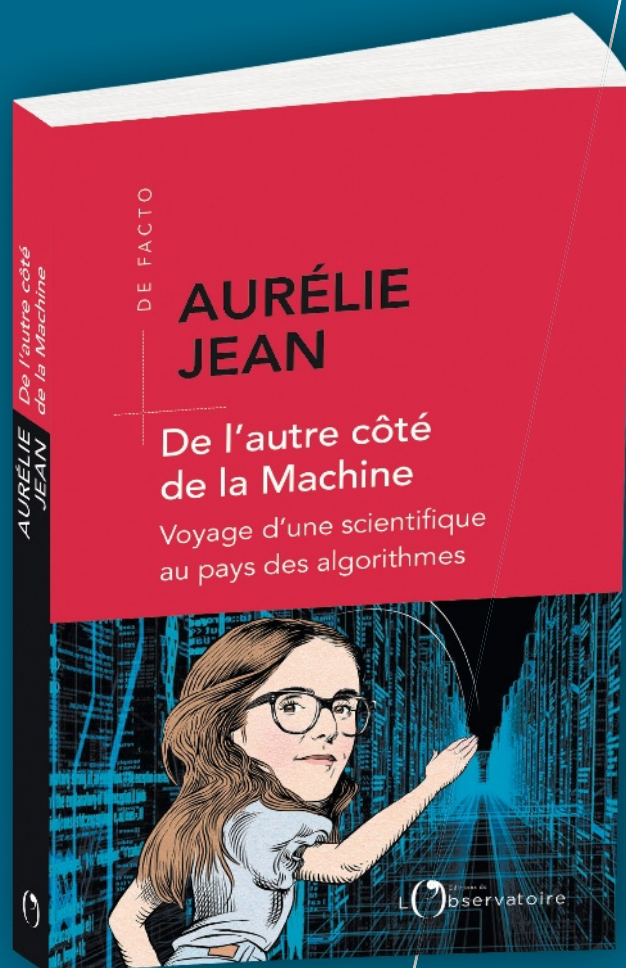
François Busnel, La Grande Librairie

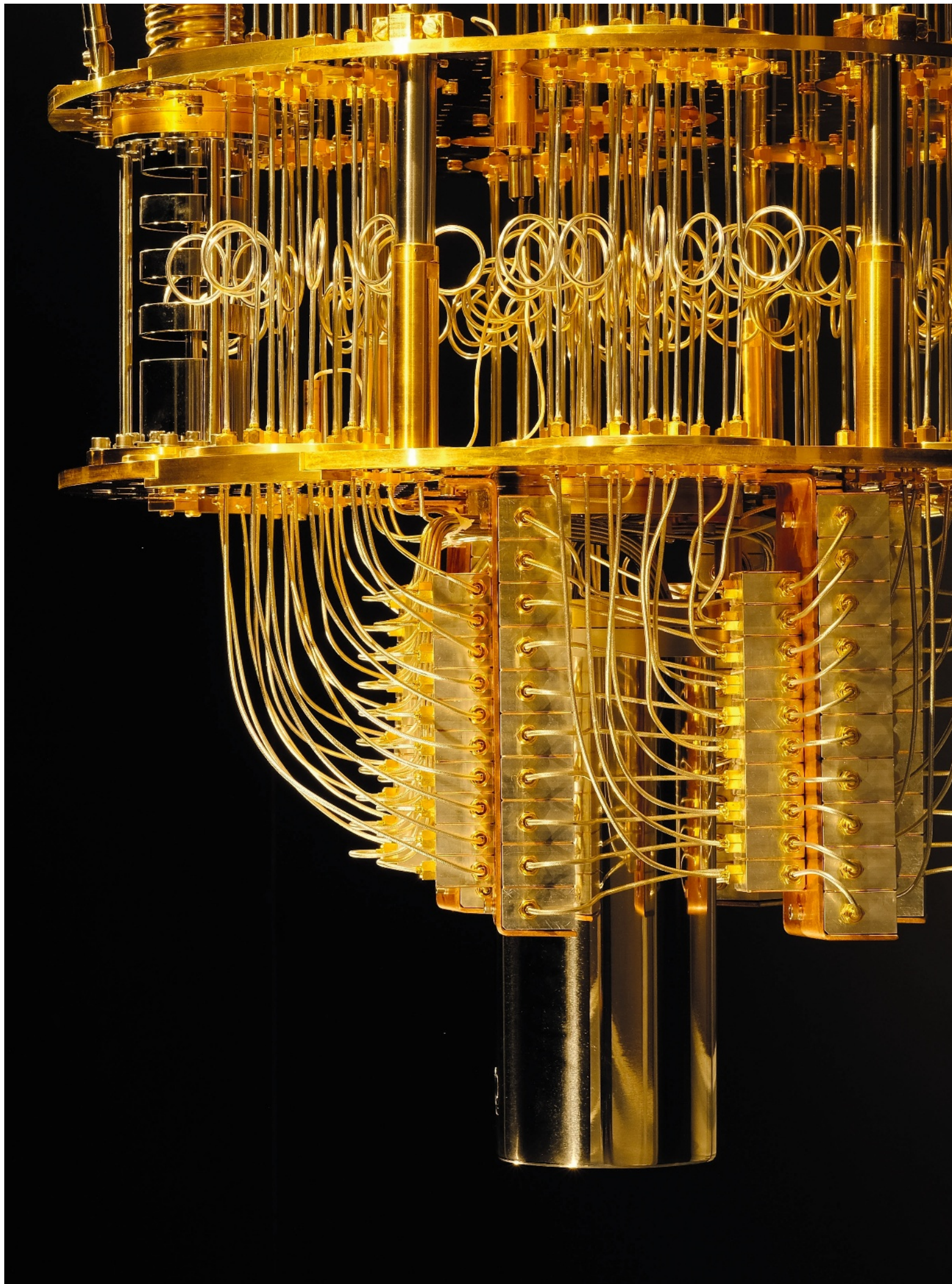
« Un récit extrêmement incarné. »

Élisabeth Quin, 28 minutes

« La figure montante
de la science numérique. »

Patrick Cohen, Europe 1







L'ORDINATEUR ULTIME

Les propriétés des systèmes quantiques (intrication, superposition, indéterminisme...) en feraient des composants de base parfaits pour concevoir une nouvelle génération d'ordinateurs qui surpasseraient de très loin nos machines classiques actuelles. La course aux qubits (l'équivalent quantique des bits classiques) est lancée et de nombreuses technologies prétendent au titre de support idéal de l'information quantique. Des annonces retentissantes quant à des records atteints se succèdent et sont vite controversées. Qu'en est-il vraiment ? Et à quoi ressemblera un éventuel internet quantique, un réseau reliant de tels ordinateurs quantiques ?

L'ESSENTIEL

- La brique élémentaire des futurs ordinateurs quantiques est le bit quantique, ou qubit.
- Plusieurs technologies sont sur les rangs pour obtenir les meilleures performances.

- Cependant, selon le profil de machine souhaitée (LSQ ou NISQ), on privilégiera certaines propriétés des qubits.
- Et rien ne dit qu'un seul type de qubit remportera la mise ni ne suffira.

L'AUTEUR



TRISTAN MEUNIER est chercheur CNRS dans l'équipe Circuits électroniques quantiques (Alpes), à l'institut Néel, à Grenoble.

Pour cet article, l'auteur remercie Maud Vinet (CEA), Antoine Browacys (CNRS, IOCF, Pasqal), Sébastien Tanzilli (CNRS) et Mazhar Miharrimi (Inria).

La course aux qubits

L'ordinateur quantique ne deviendra une réalité qu'après la mise au point de bits quantiques performants, rapides, robustes et intégrables à grande échelle. Plusieurs candidats sont en lice. Sans compter les outsiders venus du diable Vauvert.

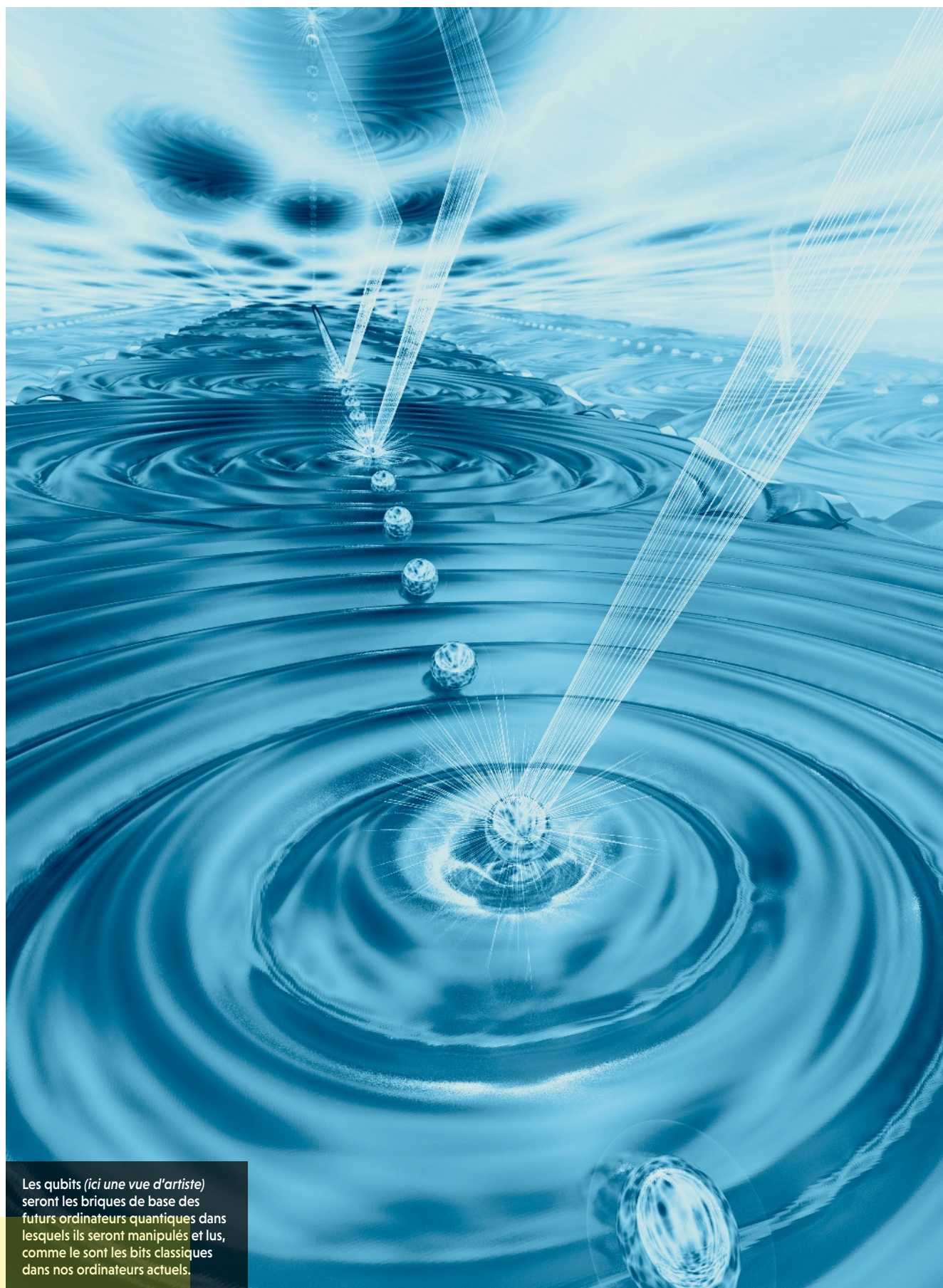
L

e record actuel est à... 53 et il date d'octobre 2019. Ni température extrême en France métropolitaine ni vitesse (en nœuds) d'une planche à voile, nous parlons ici de qubits. Plus précisément, il s'agit du nombre de qubits qui équipent l'ordinateur quantique avec lequel Google a proclamé avoir effectué un calcul bien

plus rapidement que les meilleurs supercalculateurs classiques. Contestée sur plusieurs points, cette annonce n'en est pas moins révélatrice d'une course effrénée que disputent acteurs académiques et privés, de la multinationale installée à la jeune start-up.

Mais qu'entend-on par qubit (*voir les Repères, page 6*) ? Schématiquement, il s'agit de l'équivalent quantique d'un bit classique. Alors que ce dernier peut prendre comme valeur 0 ou 1, un qubit, jouant avec les propriétés étranges du monde quantique, est une superposition de 0 et 1. Un qubit peut alors représenter deux états, deux qubits correspondre à quatre... et ainsi de suite, N qubits équivalant à 2^N états, soit pour les 53 qubits de l'ordinateur de Google, plus de 9×10^{15} états 0 et 1 !

>



Les qubits (*ici une vue d'artiste*) seront les briques de base des futurs ordinateurs quantiques dans lesquels ils seront manipulés et lus, comme le sont les bits classiques dans nos ordinateurs actuels.

➤ 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

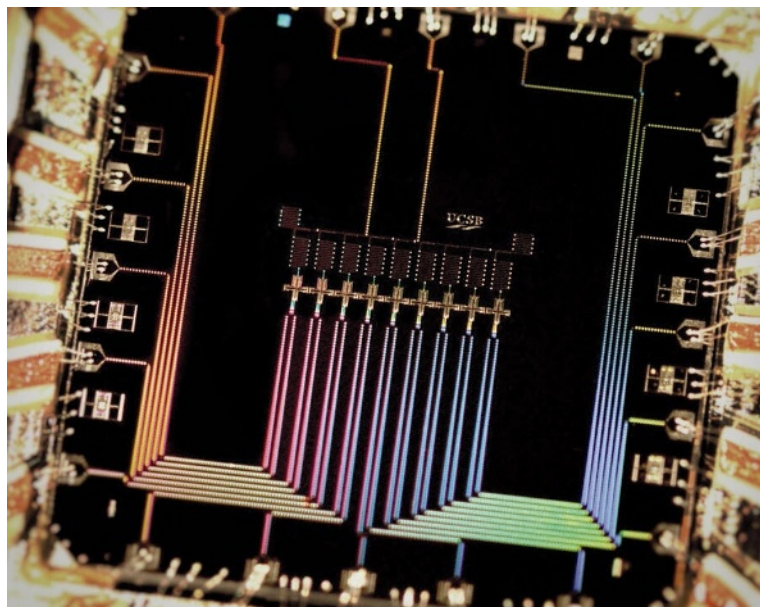
Pour répondre, il convient de distinguer deux types de machines quantiques : celles dotées de processeurs quantiques nécessitant des codes correcteurs d'erreurs et celles pour lesquelles le calcul est possible même avec un faible taux d'erreurs (voir *l'entretien avec A. Aspect*, page 10). Dans le premier 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.