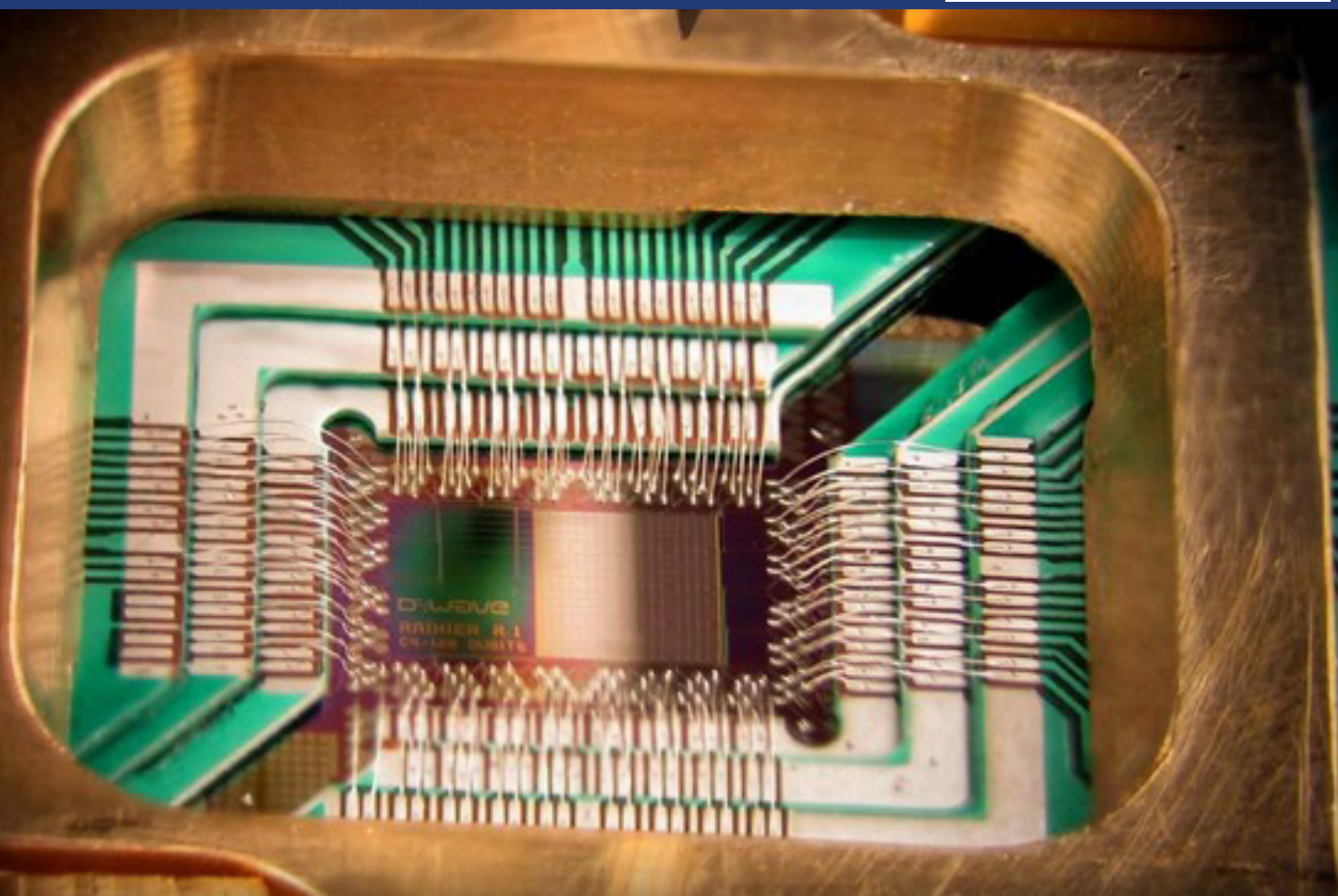




Les différents types de qubits pour les ordinateurs quantiques

Comment réaliser expérimentalement et industriellement des bits quantiques capables d'effectuer les tâches que leurs assignent les algorithmes quantiques est la question centrale de l'informatique quantique actuelle. Les recherches des meilleurs qubits qui se développent activement dans tous les pays s'orientent vers plusieurs technologies dont il est encore impossible de savoir laquelle émergera. Ce qui suit montre leur très grande variété et l'enjeu crucial qu'elles représentent pour les machines disponibles et potentielles.

Olivier Ezratty

Consultant

Introduction

L'ordinateur quantique fait parler de lui régulièrement, au gré des annonces de grandes entreprises, souvent américaines et desancements de plans gouvernementaux de pays développés qui veulent être sûrs de participer à cette révolution technologique. Il est souvent fait référence à l'émergence « d'un ordi-

nateur quantique » qui aurait une puissance extraordinaire, dans un horizon de temps variable situé entre 5 et 50 ans selon les avis.

Il est aussi fait référence aux *qubits* qui sont l'unité de traitement de l'information quantique de base, avec leurs superpositions d'états $|0\rangle$ et $|1\rangle$. Un registre quantique comprenant N qubits permet de superposer 2^N

états représentés mathématiquement par des nombres complexes et d'exécuter des opérations mathématiques sur autant de valeurs simultanément. En outre interviennent les portes quantiques qui agissent sur un ou plusieurs qubits et provoquent notamment le curieux phénomène de l'intrication qui relie de manière conditionnelle plusieurs qubits. La *superposition des états* des re-



(coc) Alexia Auffrèyes et Olivier Erratty, May 2021

Figure 1 : Typologie des différentes catégories d'émulateurs et ordinateurs quantiques et principaux acteurs.

gistes quantiques et l'intrication des qubits qui provoque des interférences entre qubits sont à l'origine du parallélisme extraordinaire procuré par le calcul quantique.

Cependant, le champ de l'ordinateur quantique est extrêmement divers. Non seulement, il existe plusieurs pistes de conception de qubits à l'échelle physique, mais aussi plusieurs catégories de machines quantiques avec des modèles de programmation très différents les uns des autres.

L'objet de cet article est de les faire découvrir au lecteur et d'en apprécier les avantages et inconvénients.

La segmentation des ordinateurs quantiques

Il n'existe pas une seule catégorie d'ordinateurs quantiques, mais plusieurs. Il faut au moins distinguer les ordinateurs quantiques à base de portes et les ordinateurs analogiques, ces derniers comprenant les simulateurs quantiques et les ordinateurs à recuit quantique tels que ceux de D-Wave.

Les ordinateurs universels à portes quantiques

Ce type d'ordinateurs utilise des qubits qui sont manipulés avec des portes quantiques agissant sur eux de manière séquentielle. On

distingue deux sous-catégories : les ordinateurs bruités de taille intermédiaire (NISQ pour *Noisy Intermediate-Scale Quantum computers*) et les ordinateurs quantiques «scalables» (LSQ, *Large Scale Quantum Computers* aussi appelés FTQC, *Fault-tolerant Quantum Computers*). Les NISQ exploitent l'état de l'art actuel des qubits physiques qui sont bruités et nuisent à la précision des calculs ainsi qu'à leur durée opérationnelle. En septembre 2021, le nombre maximum de qubits exploitable était de 65, chez IBM. Il est communément admis que ces calculateurs ne sont pas supérieurs aux plus grands calculateurs classiques. Pour y parvenir, il faudra avoir recours au FTQC/LSQ et exploiter des qubits logiques

composés de nombreux qubits physiques et gérés par des codes de correction d'erreurs quantiques (QEC pour *Quantum Error Correction*). Les LSQ devront pouvoir gérer plus de 50 qubits logiques pour avoir un intérêt pratique. Les prévisions les plus optimistes anticipent cela pour 2030.

Les simulateurs quantiques

Ces dispositifs servent à simuler des phénomènes quantiques sans utiliser de systèmes de qubits basés sur des portes. Ils fonctionnent de manière analogique et non numérique, c'est-à-dire que les paramètres reliant les qubits entre eux sont continus. Pour l'instant, il s'agit principalement d'outils



- de laboratoire. La technique la plus couramment utilisée est celle des atomes froids refroidis et contrôlés par des lasers, comme ceux développés par Pasqal (France), ColdQuanta (USA) et Atom Computing (USA). Elle est sur le point d'être commercialisée.

Les ordinateurs à recuit quantique

Développés par D-Wave (Canada) ou Qilimanjaro (Espagne), ces ordinateurs sont basés sur des qubits de faible qualité. La technique consiste à utiliser une évolution lente et contrôlée d'un ensemble de qubits reliés entre eux par des paramètres, un peu comme un réseau de neurones. Le système est initialisé éventuellement dans un état proche de la solution et il converge vers une solution optimale, qui est le résultat de la recherche d'un minimum d'énergie, comme pour la simulation des interactions atomiques dans les molécules ou l'optimisation de la durée d'un chemin complexe. Les variables sont les poids des connexions entre qubits et l'inconnue à trouver est la valeur de chaque qubit (0 ou 1). De nombreux algorithmes d'optimisation et de simulation quantique peuvent être traduits en algorithmes de recuit quantique. Jusqu'à présent, D-Wave semble apporter des gains de temps de calcul intéressants mais ceci est fortement contesté par certains spécialistes.

Le dernier système de D-Wave Advantage, est équipé d'une puce Pegasus comprenant 5 000 qubits. Mais la puissance de ces qubits n'est pas comparable à celle des qubits d'ordinateurs à portes quantiques.

Les émulateurs quantiques

Ce sont des ordinateurs classiques utilisés pour exécuter des algorithmes quantiques allant du simple ordinateur portable au superordinateur, en fonction du nombre de qubits. Ils sont utilisés pour tester et déboguer des algorithmes quantiques sans ordinateur quantique ainsi que pour l'apprentissage de la programmation. Les émulateurs quantiques sont parfois appelés simulateurs quantiques, mais cette dénomination doit être évitée pour éviter la confusion avec... les (vrais) simulateurs quantiques qui sont des ordinateurs analogiques simulant des phénomènes de physique quantique. Les émulateurs quantiques peuvent également reproduire les caractéristiques physiques de divers qubits. C'est ce que fait l'émulateur aQML d'Atos. À ce jour, les superordinateurs peuvent émuler jusqu'à l'équivalent de 40 à 50 qubits, mais des records ont été battus avec plus de 100 qubits, avec un faible nombre de portes quantiques. L'émulation d'ordinateurs quantiques nécessite une puissance importante, tant du côté de la

mémoire, pour stocker 2^N états de registres quantiques pour N qubits, que pour les traitements associés qui reposent sur des multiplications matricielles en nombres flottants.

Les accélérateurs quantiques

Il s'agit ici d'ordinateurs quantiques utilisés en complément d'un superordinateur pour exécuter des algorithmes hybrides comportant un calcul classique élaborant la structure de données alimentant l'accélérateur quantique. Le QPU (*Quantum Processing Unit*) sert d'accélérateur pour le HPC, qui exploite des CPU et/ou des GPU/TPU, ces derniers étant eux-mêmes des accélérateurs pour les CPU. Un QPU contient un ordinateur classique relié à une électronique de contrôle qui convertit les signaux numériques (portes quantiques) en signaux analogiques (micro-ondes ou lasers contrôlant les qubits et gérant leur lecture). L'ordinateur classique du QPU doit être aussi proche que possible des capacités de calcul du HPC afin d'améliorer les délais d'exécution. Cela peut conduire à créer des conceptions spécifiques intégrant un HPC et un ou plusieurs accélérateurs quantiques.

Cette classification donne le tournis et pourtant, ce qui précède en est une version simplifiée. En effet, il existe des ordinateurs

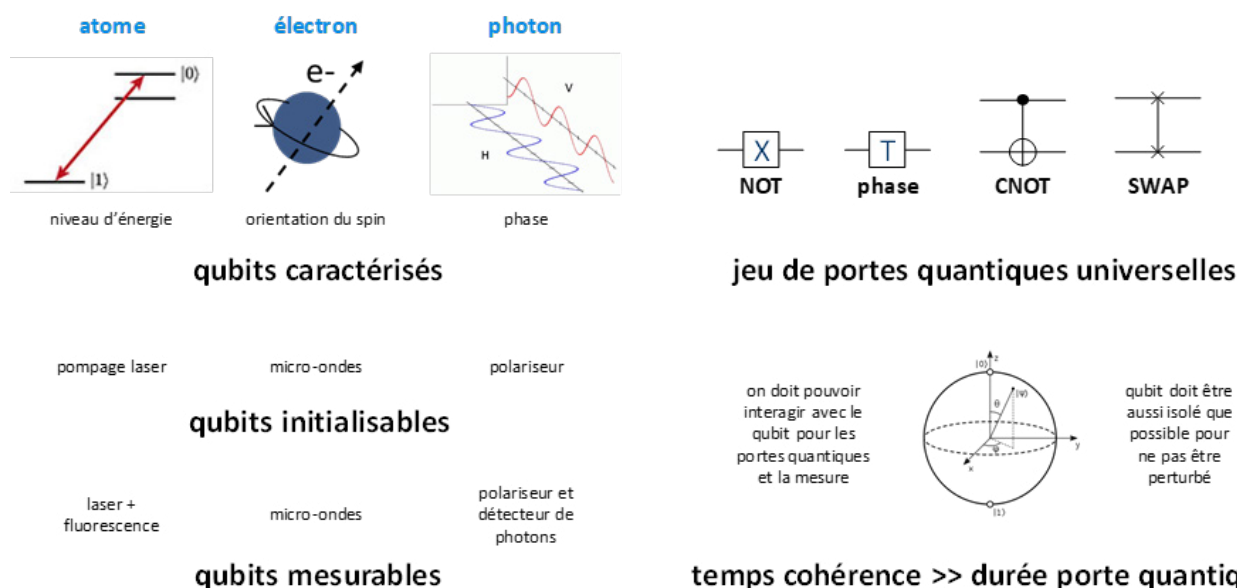


Figure 3 : Indicateurs clés d'un ordinateur quantique universel (classification de DiVincenzo-IBM).

quantiques à qubits utilisant des variables continues, des systèmes hybrides analogiques et numériques, et une quantité de variantes difficiles à classer et évaluer.

Les critères clés d'un processeur quantique

Examinons maintenant les indicateurs clés de performance des ordinateurs quantiques à base de portes. Cette série d'indicateurs a été créée par David DiVincenzo en 2000, alors qu'il était chercheur chez IBM. Alors que les qubits individuels existaient à peine, il a défini comme suit les caractéristiques techniques de base d'un ordinateur quantique universel à base de portes quantiques :

• Qubits bien caractérisés

Ils s'appuient sur des objets quantiques pouvant avoir deux états distincts et mesurables. L'architecture doit être évolutive pour pouvoir exploiter un grand nombre de qubits physiques.

• Qubits initialisables

En général, initialisables à la valeur $|0\rangle$ souvent appelée «état fondamental» pour les objets quantiques associés, correspondant par exemple au plus bas niveau d'énergie d'une particule élémentaire ou d'un atome artificiel comme pour les qubits supraconducteurs.

• Temps de cohérence

Celui-ci correspond au temps pendant lequel la superposition et l'intrication des qubits sont conservées. Il doit être supérieur au temps d'activation des portes quantiques afin de pouvoir exécuter un algorithme contenant une séquence suffisamment longue. Le rapport attendu est d'au moins 100 à 1 afin de pouvoir exécuter jusqu'à une centaine de portes quantiques à la suite, sachant que cette quantité pourra être étendue via des codes de correction d'erreurs.

• Un jeu universel de portes quantiques

Le processeur quantique doit permettre la création d'un ensemble de portes universelles qui permettent d'exécuter tous les types d'algorithmes.

“À ce jour, les superordinateurs peuvent émuler jusqu'à l'équivalent de 40 à 50 qubits, mais des records ont été battus avec plus de 100 qubits, avec un faible nombre de portes quantiques.”

• La mesure

Il faut pouvoir mesurer l'état des qubits à la fin du calcul, ce qui semble évident. Cette mesure ne doit pas influencer l'état des autres qubits du système. Idéalement, le taux d'erreur de mesure devrait être bien inférieur à 0,1 %.

David DiVincenzo a ajouté deux autres critères facultatifs qui sont plutôt utilisés pour les communications quantiques :

• Conversion en qubits volants

Il s'agit de la capacité de convertir des qubits statiques en qubits volants, qui sont généralement des photons, et permettent de relier entre eux des systèmes quantiques, calculateurs ou capteurs.

• Capacité à transporter les qubits volants

Cela suppose d'être capable de transporter les qubits d'un point à un autre de manière fiable et à distance ce qui permet de créer des architectures distribuées d'ordinateurs quantiques. Quelques fournisseurs, comme IonQ, ont annoncé qu'ils s'appuieraient sur ce genre d'architecture. Cela sera utile pour les architectures qui seront limitées en nombre de qubits.

Les critères de DiVincenzo sont assez élémentaires. D'un point de vue pratique et opérationnel, les ordinateurs quantiques peuvent également être caractérisés par une autre série de paramètres comme suit :

• Le nombre de qubits

Ce nombre va conditionner la puissance de calcul disponible. Comme cette puissance augmente théoriquement de façon exponentielle avec le nombre de qubits, c'est un paramètre clé. À la mi-2021, le record commercial était de 65 qubits chez IBM.

Certaines technologies sont plus faciles à miniaturiser et à mettre à l'échelle que d'autres. Il est nécessaire d'intégrer dans cette miniaturisation à la fois les *chipsets* de qubits quantiques et les composants électroniques qui les pilotent. En outre, on doit s'assurer que la décohérence et le bruit n'augmentent pas avec l'augmentation du nombre de qubits. Aujourd'hui, les qubits à ions piégés ont une excellente fidélité mais ne sont pas très évolutifs. Les qubits supraconducteurs semblent plus évolutifs mais leur fidélité n'est pas stable lorsque le nombre de qubits augmente.

• La connectivité des qubits

Cette propriété conditionne la manière dont les qubits sont reliés entre eux. Elle dépend de l'organisation physique des qubits en 1D, 2D voire 3D, et de la manière dont ils sont reliés entre eux. Cela conditionne la vitesse d'exécution des algorithmes quantiques. Plus cette connectivité physique est grande, plus l'exécution du code sera rapide. Avec une faible connectivité, le compilateur du code quantique devra ajouter beaucoup d'opérations pour relier les qubits entre eux, en s'appuyant notamment sur des portes SWAP qui intervertissent les valeurs de deux qubits voisins. Cette connectivité varie fortement d'une technologie à l'autre. Dans les technologies 2D, comme avec les qubits supraconducteurs ou à spins d'électrons, elle est limitée aux qubits voisins. Elle semble meilleure avec certains types de qubits à ions piégés.

• Le fonctionnement parallèle des qubits

La façon dont les portes de qubits peuvent être parallélisées sur différentes zones de qubits sans perturbation conditionnera également la vitesse d'exécution des algorithmes quantiques.



● ● ● • La fidélité des qubits

Lors de l'exécution de portes quantiques et de la lecture de leur état, la fidélité des qubits conditionne la possibilité d'exécuter des algorithmes longs. Elle a un impact direct sur la profondeur d'algorithme supportée. Elle impacte aussi la capacité à exécuter des codes de correction d'erreurs qui sont indispensables pour que les qubits servent vraiment à quelque chose.

• Le temps d'exécution

Ce paramètre concerne le temps nécessaire à l'exécution des portes quantiques et de la mesure de l'état des qubits. Le premier est évidemment important pour que les algorithmes s'exécutent le plus rapidement possible. Mais le second est tout aussi important car il intervient dans les codes de correction d'erreurs et conditionne donc le temps d'exécution de tous les algorithmes dans les calculateurs à tolérance de panne.

• La température de fonctionnement

La valeur de la température pour le processeur et son équipement dépend beaucoup du type de qubits, le Graal étant bien sûr de fonctionner à température ambiante. Les ordinateurs quantiques basés sur les supraconducteurs actuellement opérationnels fonctionnent à une température très basse de 15 mK (1 mK = 1 milli-kelvin, 0 kelvin = -273,15°C), mais certains types de qubits

encore au stade de la recherche sont censés fonctionner à température ambiante, comme ceux basés sur les photons et les centres NV (cavités dans le diamant dopé à l'azote). Cependant, ce n'est pas nécessairement le cas des équipements associés tels que les générateurs et les détecteurs de photons uniques. Opérer à très basse température est un moyen de préserver la stabilité et la cohérence des qubits. Mais plus la température est basse, plus l'énergie qui peut être rayonnée par les qubits et leur électronique de contrôle est faible. Le fonctionnement des qubits à 100 mK ou 1K, comme pour les qubits à spin d'électrons, entraîne un budget de refroidissement disponible pour contrôler les qubits qui est beaucoup plus important que le fonctionnement à 15 mK des qubits supraconducteurs.

• La consommation totale d'énergie

Cette consommation doit intégrer celle de tous les composants de l'ordinateur quantique : le processeur lui-même, toute son électronique de contrôle ainsi que les systèmes cryogéniques impliqués. La consommation d'énergie dans des calculateurs quantiques à tolérance de panne est encore une inconnue.

• La mise en rack du système

Comment les ordinateurs quantiques seront-ils déployés dans les centres de don-

nées ? S'intègrent-ils dans des systèmes de rack standard ? C'est ce que prévoient de nombreuses startups telles que Pasqal, Qandela et Alpine Quantum Technologies. La mise en rack est associée à des questions de poids, d'espace, de refroidissement et d'alimentation électrique. Quels types de fluides utiliser pour le refroidissement, généralement de l'eau froide, reliée au compresseur du premier étage des cryostats, quelle que soit leur taille ? Les ordinateurs quantiques doivent également résister aux conditions habituelles des centres de données, comme les vibrations, la poussière et l'environnement électromagnétique, ou être séparés dans des installations spéciales isolées. Ils pourraient être installés dans les blocs de construction modulaires utilisés dans les centres de données les plus récents.

Ces trois derniers paramètres opérationnels jouent un rôle lors du déploiement d'ordinateurs ou d'accélérateurs quantiques dans les centres de données dans le *cloud*.

Les différents types de qubits

Les ordinateurs quantiques sont des dispositifs qui manipulent des particules ou des quasi-particules ayant une propriété physique qui peut avoir deux états exclusifs possibles, lesquels peuvent être initia-

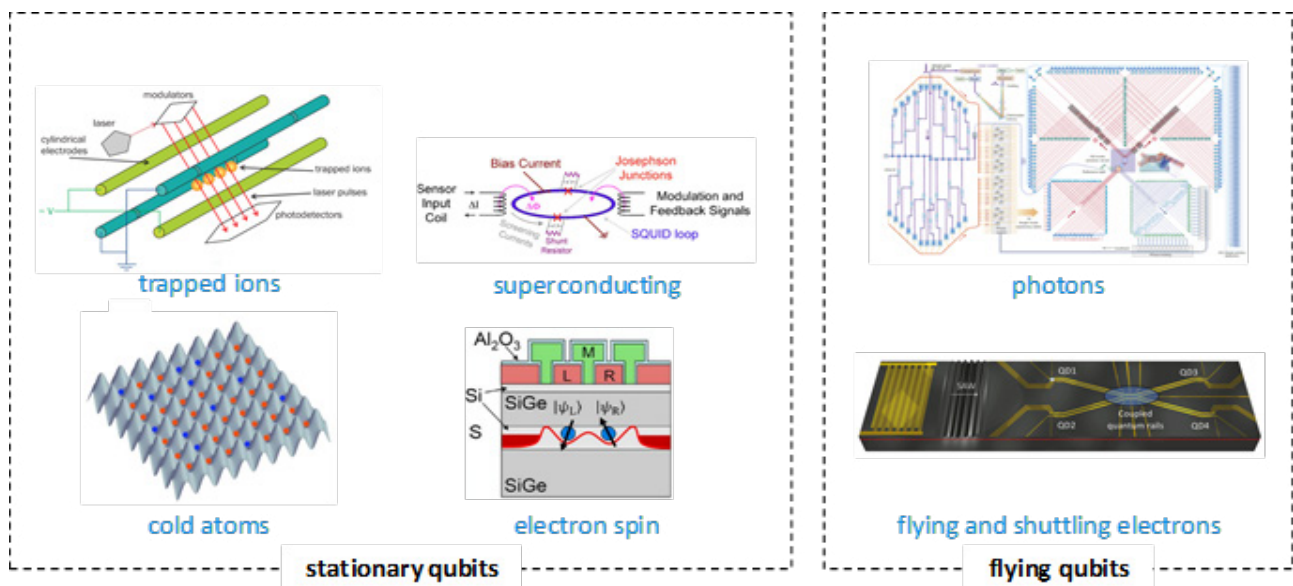


Figure 4 : Exemples de technologies faisant appel à des qubits stationnaires ou des qubits volants.

lisés, modifiés avec des portes quantiques et ensuite mesurés.

Ce sont parfois des particules élémentaires individuelles, comme les *atomes* (ions piégés et atomes froids), les *électrons* dont on contrôle le spin ou des *photons* ! Dans le cas des qubits supraconducteurs, l'état quantique est basé sur un grand nombre d'électrons arrangés en paires de Cooper qui partagent le même état quantique.

Les qubits sont de deux types : stationnaires ou en mouvement. Ceux qui sont basés sur les ions piégés, les atomes froids, les électrons piégés et les boucles supraconductrices sont stationnaires. Les qubits volants sont basés sur des photons qui circulent physiquement de porte quantique en porte quantique ainsi que sur des électrons volants, une technique de laboratoire encore exotique.

Dans le cas de qubits stationnaires, les portes quantiques sont activées dynamiquement par des circuits électroniques ou des lasers qui agissent sur les qubits.

Voici les principaux types de qubits qui sont actuellement étudiés, testés et parfois commercialisés.

Atomes

C'est l'un des plus anciens types de qubits. Il consiste à contrôler des atomes dans le vide avec des lasers, un qubit par atome. Les atomes froids sont neutres tandis que les ions piégés sont des atomes ionisés. Une différence essentielle est la façon dont ces atomes sont contrôlés dans l'espace. Les ions peuvent être positionnés à l'aide d'électrodes et de champs magnétiques, tandis que les atomes non ionisés ne sont contrôlés que par des lasers. Tous deux partagent la même technique de mesure, qui utilise l'excitation laser, la fluorescence et une lecture visuelle avec un capteur photo.

Les **ions piégés** sont maintenus dans le vide et suspendus par une suspension

“Les ordinateurs quantiques sont des dispositifs qui manipulent des particules ou des quasi-particules ayant une propriété physique qui peut avoir deux états exclusifs possibles, lesquels peuvent être initialisés, modifiés avec des portes quantiques et ensuite mesurés.”

électrostatique. Leur initialisation se fait par pompage optique laser. Les ions les plus fréquemment utilisés sont le calcium et l'ytterbium. Les principaux fournisseurs de cette catégorie sont IonQ, une spin-off de l'université du Maryland, AQT (*Alpine Quantum Technologies*), une spin-off de l'université d'Innsbruck en Autriche et Honeywell Quantum Systems.

Bien que les ions piégés soient les meilleurs de leur catégorie pour la fidélité et la connectivité des qubits, il semble actuellement difficile de les «mettre à l'échelle» au-delà d'une centaine d'ions. Ils sont aussi très lents.

Les **atomes froids** sont refroidis à très basse température en utilisant l'effet Doppler. Les atomes utilisés sont assez souvent du rubidium, un métal alcalin. Ces atomes sont excités dans l'état de Rydberg, un niveau d'énergie élevé, pour contrôler leur intrication. L'état quantique de ces atomes froids est leur niveau d'énergie. Les atomes froids sont utilisés pour créer des qubits d'ordinateurs quantiques avec des portes quantiques universelles ou pour la simulation quantique analogique. La startup française Pasqal travaille sur ces deux pistes et a été capable de contrôler jusqu'à 196 atomes en mode «simulation».

Électrons

Cette autre catégorie de qubits concerne des électrons qui sont contrôlés la plupart du temps dans des circuits à l'état solide et non dans le vide comme avec les atomes froids et les ions piégés.

Les **qubits supraconducteurs** sont basés sur l'état d'un courant supraconducteur qui traverse une barrière très mince dans une boucle, généralement un oxyde métallique comme l'aluminium, en utilisant l'effet Josephson. Il existe plusieurs types de qubits supraconducteurs, le plus courant étant le *transmon* qui est utilisé par Google et IBM. Dans tous les cas, les valeurs exploitées des qubits sont deux états très distincts d'un courant oscillant à haute fréquence qui traverse la jonction Josephson.

L'oscillation est rendue possible par le fait que la boucle intègre l'équivalent d'une inductance et d'une résistance. L'oscillation du courant est activée par l'application de micro-ondes de fréquences comprises entre 4 et 8 GHz transmises par des fils coaxiaux. La valeur du qubit est évaluée avec un résonateur intégré au circuit qui reçoit une micro-onde et la renvoie avec un déphasage plus ou moins important.

Les qubits supraconducteurs sont utilisés par IBM, Google, Rigetti, QCI, Intel. Amazon et Alice&Bob quant à eux explorent la technique du cat-qubits en utilisant une cavité avec des micro-ondes oscillantes, sa valeur étant initialisée et récupérée avec un qubit transmon.

Les **qubits supraconducteurs** sont relativement faciles à fabriquer car ils sont basés sur les techniques de création de circuits semi-conducteurs, même si certains matériaux sont différents, comme le niobium et l'aluminium. Ils fonctionnent à 15 mK, ce qui nécessite une réfrigération par dilution à base d'hélium. De nombreux contributeurs ont participé aux premiers développements de ●●●

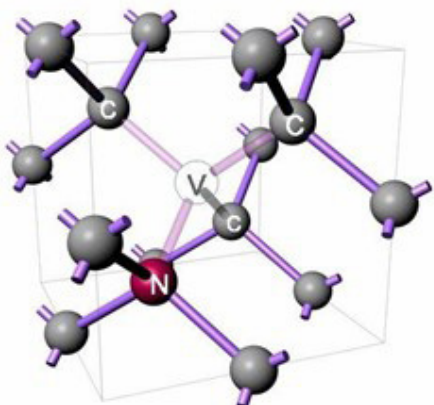


Figure 5 : Centres NV du diamant – Source : Quantum materials and applications.

- la supraconductivité avec Anthony Leggett aux Etats-Unis, l'équipe de Michel Devoret et Daniel Estève au CEA Saclay et Yasunobu Nakamura au Japon.

Les qubits supraconducteurs présentent de nombreux défis en matière d'évolutivité. Les générateurs de micro-ondes sont généralement situés à l'extérieur de l'enceinte cryogénique du processeur quantique, ce qui crée beaucoup de câblage avec environ 3 à 4 câbles par qubit. Les fréquences de contrôle des qubits doivent être différentes et accordées pour des qubits adjacents. Leur fidélité n'est pas la meilleure de leur catégorie et semble diminuer à mesure que l'on augmente le nombre de qubits. Mais IBM et Google, entre autres, ont prévu de construire des ordinateurs pouvant compter jusqu'à un million de qubits physiques, avec 100 qubits logiques.

Les qubits à **spin d'électrons** sont développés dans une optique d'évolutivité. La plupart d'entre eux utilisent deux électrons piégés dans un puits quantique, l'un contenant le qubit et l'autre servant à le mesurer. Ces qubits sont généralement fabriqués à l'aide de circuits CMOS à base de silicium et de dopants divers. Ils bénéficient de la réutilisation de procédés de fabrication CMOS déjà bien maîtrisés. Ces qubits sont faciles à miniaturiser jusqu'à moins de 100 nm. Ils fonctionnent à des températures comprises entre 100 mK et 1K, plus élevées que celles des qubits supraconducteurs, ce qui permet d'utiliser davantage d'électronique autour du *chipset* pour générer les micro-ondes et

autres signaux électriques nécessaires à la création des portes quantiques et à la lecture des qubits.

Intel est la plus grande société investie dans les qubits à spins d'électrons pour une raison évidente, étant le plus grand fabricant de composants CMOS au monde. Citons aussi Quantum Motion (Royaume-Uni), SQC (Australie) et le CEA-Leti à Grenoble (France) en association avec le CNRS (Institut Néel).

Les **centres NV** (*Nitrogen Vacancy*) sont des structures de diamant artificielles dans lesquelles un atome de carbone a été remplacé par un atome d'azote à proximité d'une lacune d'atome de carbone. Les états et le contrôle des qubits reposent sur une combinaison des spins des électrons, de l'azote et du noyau ^{13}C du carbone. Les portes quantiques sont mises en œuvre avec des micro-ondes, un champ magnétique et un champ électrique. L'intrication est gérée par des photons, un couplage magnétique ou le contrôle du spin du noyau d'atomes de carbone ^{13}C voisins via l'utilisation de micro-ondes pour créer une porte CNOT. La lecture de l'état des qubits utilise un laser et la détection de fluorescence avec un capteur photo.

Les défauts dans les diamants ont été étudiés à partir de 1930 avec l'examen de l'absorption infrarouge. Cela a permis de distinguer deux catégories de diamants : le type I avec une bande d'absorption de 8 μm dans l'infrarouge et le type II sans cette bande. Ces défauts expliquent la couleur des pierres précieuses en diamant. Ce n'est qu'en 1959 que l'on a découvert que ces impuretés étaient liées à la présence d'azote, à 7,8 μm et que les atomes d'azote étaient bien isolés dans le cristal de diamant. En 1975, on a montré que certains traitements thermiques pouvaient contrôler la diffusion des atomes d'azote dans le diamant. Ces centres d'azote expliquent la couleur du diamant. Il en existe quatre types : un atome d'azote isolé dans un espace, deux atomes d'azote, trois atomes d'azote entourant un espace et quatre atomes d'azote. C'est le premier type qui est intéressant à la fois pour l'information quantique et les capteurs quantiques.

L'auteur

Olivier Ezratty (ECP85) est consultant



et auteur, notamment des ouvrages de référence «Comprendre l'information quantique» (septembre 2020) et sa version actualisée en anglais «Understanding Quantum Technologies» (septembre 2021), diffusés gratuitement en PDF. Il anime aussi deux séries de podcast (Quantum et Decode Quantum) avec Fanny Bouton.

La start-up américaine QDTI travaillait commercialement sur cette technique pour créer des qubits. Mais elle a changé de cap pour se concentrer sur les utilisations médicales de la détection quantique à base de diamant. Quantum Brilliance (2019, Australie) semble être la seule à se positionner sur ce créneau. Ils ont annoncé début 2021 avoir créé un système à 5 qubits et prévoient de le mettre rapidement à l'échelle. Ils survendent un peu leur technologie en indiquant qu'elle fonctionnera à température ambiante et dans un ordinateur de format desktop.

Les qubits volants

Les qubits volants sont particuliers car ils voyagent à partir de leur lieu d'origine, traversent des dispositifs physiques agissant sur eux et terminent leur voyage sur un capteur mesurant leur état. Ils disposent d'un temps limité pour exécuter tout calcul, y compris un nombre fini et restreint de portes quantiques.

Les **photons** sont les qubits volants les plus courants, mais il en existe de nombreuses variantes. Un type est basé sur l'état de polarisation horizontale/verticale. D'autres utilisent des qubits à variables continues.

Il est assez difficile de créer des portes quantiques à deux qubits avec ces qubits photons, d'où l'alternative de l'architecture

MBQC (*Measurement Based Quantum Computing*), une solution de contournement intéressante qui s'appuie sur des sources de photons préalablement intriquées et sur des portes quantiques à un qubit et sur la mesure de qubits. De plus, la génération des photons suit un modèle probabiliste qui complique les choses lorsque le nombre de qubits augmente.

La plupart de ces qubits fonctionnent à température ambiante, mais les sources de photons et leurs détecteurs doivent cependant généralement être refroidis à des températures comprises entre 2K et 10K, ce qui est beaucoup moins exigeant que les 15 mK des qubits supraconducteurs ou les 1K des qubits au silicium. La raison, pour les détecteurs de photons uniques, est qu'une basse température permet d'éviter de détecter des photons infrarouges liés au bruit thermique ambiant.

De nombreuses startups jouent dans ce domaine, comme PsiQuantum, Orca Computing, Xanadu (variables continues) et Quandela (France).

Les **électrons volants** sont à un stade de recherche pure, basée sur l'utilisation du transport d'électrons uniques circulant sur des

nanostructures de guide d'ondes construites sur des circuits semi-conducteurs, principalement GaAs (arséniure de gallium), en tirant parti du couplage de Coulomb, de l'effet Hall de charge quantique et d'ondes acoustiques de surface. Des portes quantiques à un ou deux qubits peuvent être réalisées sur ces circuits. Les électrons peuvent se déplacer sur une distance de 6 à 250 microns. Ils sont créés en produisant des photons THz qui sont convertis en électrons. Un qubit utilise deux trajectoires d'électrons pour les états $|0\rangle$ ou $|1\rangle$. Cette technique pourrait également être utilisée pour créer des qubits volants reliant entre eux des qubits statiques à base de points quantiques. Quelques laboratoires dans le monde travaillent sur ce sujet, notamment le NPL au Royaume-Uni, la Ruhr-Universität Bochum, ERATO-JST et AIST au Japon, le CEA-Leti et l'Institut Néel à Grenoble, en France.

Bilan

Les ordinateurs quantiques d'aujourd'hui ont des puissances de calcul qui ne dépassent pas celles de quelques serveurs classiques. L'avantage quantique interviendra lorsque des calculateurs quantiques seront capables de réaliser des tâches inaccessibles aux ordinateurs classiques.

Le chemin pour y parvenir est semé d'embûches. L'ennemi est la décohérence des qubits. La parade est la correction d'erreurs. Celle-ci requiert l'assemblage d'un grand nombre de qubits physiques pour créer des qubits logiques, avec des enjeux de mise à l'échelle en termes d'électronique et, le plus souvent, de thermodynamique et de cryogénie. Et encore, nous n'avons pas étudié ici les algorithmes quantiques ni leur avantage réel en termes de vitesse d'exécution une fois prises en compte la correction d'erreurs et d'autres contraintes diverses. Nous n'avons pas non plus traité l'épineuse question de la mémoire quantique, une technologie qui n'est pas du tout au point et qui est nécessaire pour de nombreux algorithmes quantiques.

Le point positif à noter c'est la très grande diversité des approches technologiques explorées par les laboratoires de recherche et les entreprises. Il est probable qu'elle aboutira à une hybridation technologique.

En attendant l'échéance de l'avantage quantique, il est probable qu'il sera possible de tirer parti des capacités des simulateurs quantiques comme ceux de la startup française Pasqal pour exécuter de nombreux algorithmes. ■

Résumé

L'informatique quantique dont le développement remonte aujourd'hui à plus de vingt ans, utilise comme information de base un nouveau type de bit logique appelé qubit. Ces qubits obéissent aux lois de la physique quantique, ce qui permet d'effectuer des opérations définies par les algorithmes quantiques. Par nature, les qubits véhiculent les états superposés et intriqués qui caractérisent l'informatique quantique. Pour assurer une bonne exécution des algorithmes, les états des qubits ne doivent pas être affectés par l'environnement, ce qui implique que leurs représentations dans le monde physique et expérimental sont cruciales. C'est pourquoi les qubits font l'objet de nombreuses recherches technologiques qui devraient influencer les performances futures des ordinateurs quantiques. Il est encore difficile de savoir quelle sera la technologie des qubits qui garantira les qubits les plus fidèles, capables d'effectuer des opérations algorithmiques avec un minimum d'erreurs. ■

Abstract

Quantum computing, developed today for more than twenty years, is using a new type of logical bit called qubit as basic information. These qubits obey the laws of quantum physics which makes it possible to perform the operations defined by the quantum algorithms. Qubits by nature convey the superimposed and entangled states that are characteristic of quantum computing. To ensure the proper execution of the algorithms, the states of the qubits must not be affected by the environment, which implies that their representations in the physical and experimental world is crucial. This is why qubits are the subject of a great deal of technological research which should influence the future performance of quantum computers. It is still difficult to know which qubit technology will be able to ensure the most faithful qubits and to perform algorithm operations with a minimum of errors. ■