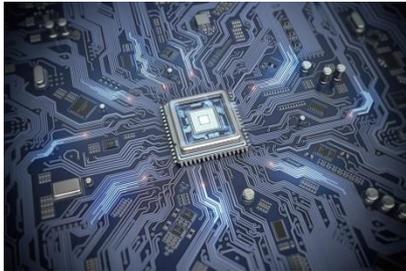


Note n° **15** — **Technologies quantiques : l'ordinateur quantique** _____ Juillet 2019



Résumé :

- *Théorisé dans les années 1980, l'ordinateur quantique connaît depuis quelques années un intérêt marqué. De récents progrès techniques laissent entrevoir des possibilités de calcul considérables face à des besoins de plus en plus importants.*
- *Il reste cependant de nombreux défis technologiques à surmonter. Différentes technologies sont entrées en concurrence et une attention devra être portée à leurs développements respectifs, tout en considérant les « effets d'annonce » avec prudence.*
- *Des cas d'utilisation du potentiel quantique, et de ses spécificités, voient déjà le jour. Loin d'être une « menace » pour les technologies actuelles, l'ordinateur quantique devra, au contraire, cohabiter avec elles et les compléter.*

M. Cédric Villani, Député, Premier vice-président

Le calcul numérique tient une place de plus en plus importante dans notre société, avec des besoins qui ne cessent de croître et qui obligent les industriels du secteur à une course à la performance. Actuellement, **les supercalculateurs les plus puissants sont de type « pétaflopique »** (un million de milliards d'opérations par seconde) **et demain « exaflopique »** (un milliard de milliards d'opérations par seconde). À titre d'exemple, un supercalculateur pétaflopique exécute une prévision météorologique à 24 heures en 30 minutes alors qu'il faudrait plus d'une année à un ordinateur personnel pour en faire de même. Ils constituent un des premiers postes de dépenses pour les structures qui les utilisent⁽¹⁾ (centres de recherche, industries...) que ce soit en termes de consommation électrique⁽²⁾ pour leur alimentation mais aussi pour leurs systèmes de refroidissement pour éviter les surchauffes et les incendies ou en termes de prix d'achat⁽³⁾. Les supercalculateurs restent cependant indispensables, d'une part, face à l'accroissement des volumes et des débits de données à traiter, d'autre part, face au développement de simulations numériques toujours plus précises et complexes⁽⁴⁾.

Si les développements technologiques ont pu s'appuyer, jusqu'à présent, sur une augmentation exponentielle de la densité de transistors des ordinateurs, grâce à la loi de Moore⁽⁵⁾, cette dernière arrive à ses limites (palier attendu à l'horizon 2022) ce qui rend nécessaire une rupture technologique. C'est dans ce contexte que l'ordinateur quantique apparaît comme une solution ambitieuse.

Principe et promesses du calcul quantique

Dans un ordinateur classique, la brique élémentaire d'information est le bit qui peut prendre deux valeurs (états) possibles soit 0 soit 1⁽⁶⁾. Dans le monde de l'informatique quantique, son équivalent s'appelle le **qubit**⁽⁷⁾. Ce qubit désigne un objet physique (atome, ion, électron, photon...) dans un état quantique⁽⁸⁾. En application du **principe de superposition**⁽⁹⁾, l'état d'un qubit est **une combinaison des états 0 et 1** ; et, grâce à **l'intrication**⁽¹⁰⁾, **différents qubits peuvent être liés entre eux**. Les ensembles de qubits forment un « **registre de qubits** ». En physique classique, ajouter un bit supplémentaire permet de décrire seulement une valeur de plus ; en physique quantique, l'ajout d'un nouveau qubit double la puissance de calcul théorique⁽¹¹⁾. Ainsi, une **machine quantique de 10 qubits peut traiter simultanément $2^{10} = 1\ 024$ états** (contre 10 pour une machine classique disposant de 10 bits). Un **ajout de 10 qubits équivaut en conséquence à environ 15 ans d'évolution de machines classiques s'inscrivant dans la loi de Moore**. Plus la dimension du problème à résoudre augmente, et, plus l'ordinateur quantique devient exponentiellement plus efficace qu'un ordinateur classique.

L'objectif actuel des différents acteurs du marché, qu'ils soient industriels ou académiques, consiste à créer un ordinateur disposant de plusieurs centaines de qubits, voire de plusieurs milliers, et capable de **rivaliser en vitesse et en fiabilité avec les supercalculateurs classiques de pointe**.

Cette puissance et sa progression éventuelle révolutionneraient complètement notre société, dans laquelle le numérique tient une place de plus en

plus importante. Les ordinateurs quantiques permettraient des avancées majeures dans de nombreux domaines, en résolvant de manière efficace des problèmes réputés complexes ou gourmands en temps de calcul et/ou énergie.

Le calcul quantique avec des qubits

Le calcul numérique quantique s'inspire des processeurs informatiques classiques pour exécuter une suite d'opérations sur un registre de qubits, à l'aide de portes (ou fonctions) logiques⁽¹²⁾. En 2000, David DiVincenzo, alors chercheur chez IBM, proposait 5 conditions, connues sous le nom des « critères de DiVincenzo »⁽¹³⁾, considérés comme nécessaires à la réalisation d'un ordinateur qualifié de quantique :

- disposer d'un **support physique avec des qubits bien caractérisés** (dont on connaît les propriétés et le comportement) ;
- déterminer et contrôler l'**état quantique initial** de ces qubits ;
- maintenir la **cohérence quantique** pendant le temps nécessaire au calcul en isolant le système. En effet, à la suite de perturbations extérieures, les qubits finissent par perdre leur dimension quantique : c'est le phénomène de **décohérence**⁽¹⁴⁾, qui empêche la poursuite du calcul. Plus le nombre de qubits intriqués augmente et plus le risque de décohérence est élevé ;
- savoir **effectuer toutes les opérations nécessaires avec des portes logiques quantiques** et un faible taux d'erreur et de décohérence ;
- savoir **mesurer** précisément l'**état final** des qubits, lorsque le calcul est terminé. L'observation d'un système quantique est probabiliste : elle fournit « en moyenne » le résultat attendu, qui peut varier à chaque exécution. Il peut donc être nécessaire de recommencer le calcul plusieurs fois⁽¹⁵⁾.

Dans la pratique, ces critères sont loin d'être simples à satisfaire et, malgré beaucoup d'annonces, aucune machine « quantique » n'y répond totalement et parfaitement, notamment en ce qui concerne la gestion du phénomène de décohérence.

La gestion d'erreurs des qubits

Un calcul quantique n'a de sens que si les erreurs et la décohérence restent marginales. En informatique classique, quand on souhaite limiter les erreurs de transmission d'un message dans un canal de communication « bruité », une solution consiste à envoyer plusieurs copies du message de sorte qu'au moins une d'entre elles arrive intacte. Afin de limiter le bruit dans le calcul quantique, une approche similaire, basée sur les **codes correcteurs quantiques**, est envisagée⁽¹⁶⁾. Elle consiste à **multiplier les qubits physiques** (support physique de l'information) **afin de faire fonctionner in fine, quelques qubits dits lo-**

giques (capables de traiter parfaitement l'information et d'effectuer le calcul logique). Les qubits physiques victimes d'erreurs seront relayés par les autres qubits afin de terminer l'opération en cours. À ce jour, avec les technologies actuelles, **le ratio entre qubits physiques et logiques varie entre 10^3 et 10^5 . Autrement dit, pour faire fonctionner 50 qubits logiques, réellement disponibles pour l'utilisateur, il faut entre 50 000 et 5 millions de qubits physiques.** Si les progrès récents visent à diminuer ce ratio, il n'est cependant pas encore possible d'exploiter cette correction d'erreur dans la pratique, puisque les prototypes de machines quantiques les plus récents ne disposent que d'environ **50 qubits physiques**, dont les caractéristiques varient selon la technologie utilisée.

Différents supports physiques d'information

Différentes formes de qubits sont actuellement développées en parallèle. Elles présentent chacune des avantages et des inconvénients, mais aussi des différents degrés de maturité. Parmi les plus avancés technologiquement, figure le qubit le plus ancien, mis en pratique pour la première fois dès 1995⁽¹⁷⁾, qui utilise des **ions piégés**. Quelques ions sont maintenus dans une cavité (qui joue le rôle du piège) et sont contrôlés par des impulsions électromagnétiques (via un laser) afin de modifier leur état quantique. Actuellement, des systèmes de 5 à 20 qubits ont été ainsi réalisés, avec un taux d'erreur sur les opérations de l'ordre de 2 à 5 %. Les ions piégés présentent un temps de décohérence long, d'environ une seconde, qui permet de compenser la lenteur des portes logiques. Cependant, une intégration à grande échelle semble encore difficile pour cette technologie. La technique des **atomes froids** remplace les ions piégés par des atomes neutres⁽¹⁸⁾. Dans ce cadre, la cohérence peut être maintenue sur environ une milliseconde tandis que le passage d'une porte logique prendrait 1 microseconde (1 000 fois moins de temps). Enfin, les **qubits supraconducteurs**⁽¹⁹⁾ à base de jonctions Josephson⁽²⁰⁾, mis au point à la fin des années 1990, constituent, actuellement, les qubits les plus utilisés, sous la forme de « transmon »⁽²¹⁾. Cette technique utilise une paire d'électrons liés⁽²²⁾, qui, couplée à une cavité micro-onde⁽²³⁾, induit un léger changement de fréquence suivant l'état du qubit et permet ainsi la mesure de ce dernier⁽²⁴⁾.

Les acteurs choisissent et investissent dans la technologie qui leur semble la plus prometteuse, même si aucune de ces différentes méthodes n'est encore complètement aboutie. **L'enjeu scientifique est d'identifier, à court ou moyen terme, la forme de qubit la plus rentable et qui se prête le mieux à une intégration à grande échelle.** Les grands industriels semblent, pour leur part, favoriser, jusqu'à présent, les qubits supraconducteurs.

Régulièrement, des annonces sont faites sur la

mise au point de processeurs quantiques comptant un nombre croissant de qubits. En 2018, Google a ainsi annoncé un système de 72 qubits (supraconducteurs)⁽²⁵⁾ ; en 2017, Intel et IBM avaient respectivement atteint 49 et 50 qubits⁽²⁶⁾ (aussi supraconducteurs). Mais leurs performances ne sont pas documentées ce qui **rend compliqué une évaluation rigoureuse de ces annonces.** Cependant, chaque architecture, qui repose sur un support physique répondant, en théorie, aux critères de DiVincenzo, possède ses caractéristiques propres, notamment en termes de temps de cohérence, de fiabilité, etc. **Il serait donc important de choisir un standard international permettant une comparaison objective de la qualité des qubits et prenant en compte les spécificités de chaque technologie**⁽²⁷⁾.

Des approches alternatives se mettent aussi en place. Ainsi, depuis 2012, des qubits sont réalisés en utilisant le **spin**⁽²⁸⁾ **des électrons dans un matériau semi-conducteur (silicium).** Cette approche est explorée au CEA-Leti (Grenoble), et par Intel au centre néerlandais QuTech (*Technische Universiteit Delft*) et à l'UNSW (*University of New South Wales*) en Australie avec des temps de cohérence suffisants pour pouvoir effectuer des calculs. En outre, l'usage de silicium permettrait d'adapter les standards actuels de fabrication électronique et microélectronique, afin d'envisager une production en série à grande échelle et de **positionner la France sur l'échiquier mondial des technologies de qubits.**

La société canadienne D-Wave développe des processeurs analogiques utilisant la méthode alternative dite de « recuit quantique » qui vise à faire converger un système de plusieurs qubits vers un état final correspondant à un minimum d'énergie (optimisé), l'état final étant l'information recherchée. Partis de 128 qubits en 2011, ces machines atteignent maintenant 2 048 qubits⁽²⁹⁾. Quelques applications ont déjà été mises au point, dans le domaine de la science des matériaux, de l'optimisation ou encore dans le domaine de pointe du *machine learning*⁽³⁰⁾. **Il existe cependant un débat dans la communauté scientifique sur l'avantage quantique apporté par ces machines par rapport à des algorithmes adaptés à des supercalculateurs.**

Perspectives d'utilisation à court et moyen termes

À court terme et sans rupture technologique majeure en ingénierie, seules la construction et l'utilisation de machines NISQ (voir encadré) sont envisageables. Celles-ci nécessitent le développement d'algorithmes tolérants aux erreurs.

Une autre piste de valorisation du potentiel quantique consiste à combiner un ou des processeurs quantiques de quelques qubits corrigés avec une architecture composée de bits classiques. Ces systèmes hybrides permettent d'optimiser les domaines

d'expertise de chaque technologie et d'utiliser une « **accélération quantique** » pour des besoins spécifiques, sur le modèle des puissants processeurs graphiques (GPU, *Graphics Processing Unit*) utilisés pour les supercalculateurs. De manière générale, **l'ordinateur quantique aura sans doute vocation à résoudre seulement une classe particulière de problèmes, et non à se substituer intégralement aux machines classiques.**

La technologie NISQ^(*) (*Noisy intermediate-scale quantum technology*):

Introduite par John Preskill, physicien à Caltech, en 2018, la notion de technologie « NISQ », ou « quantique bruité », désigne des **ordinateurs quantiques de taille intermédiaire, disposant de 50 à 100 qubits physiques pour lesquels les erreurs ne sont pas corrigées.** Si cela limite la complexité des problèmes que ces machines peuvent résoudre, il n'en reste pas moins intéressant de développer cet axe de recherche, notamment afin de créer une offre commerciale qui puisse dynamiser les investissements à court terme, en attendant des ordinateurs quantiques « parfaits » (*i.e* avec un très faible taux d'erreur) ou avec un très grand nombre de qubits traités avec des codes de correction d'erreurs.

^(*)PRESKILL, John. "Quantum Computing in the NISQ era and beyond." *Quantum*, 2018, vol. 2, p. 79.

Conclusions et perspectives

Imaginé au plan théorique il y a plusieurs décennies, l'ordinateur quantique commence, seulement depuis quelques années, à susciter l'intérêt des industriels. Cependant, de nombreux verrous technologiques et théoriques doivent encore être levés avant une utilisation à grande échelle et l'avènement de la « suprématie quantique » sur les ordinateurs classiques. Lancés dans une concurrence vive, avec des enjeux importants, les industriels n'hésitent pas à jouer sur des effets d'annonce qu'il convient de modérer, car tous les qubit annoncés ne sont pas de même qualité. L'élaboration d'un standard international de qubit permettrait de mieux comparer les différentes technologies entre elles. Dans le scénario le plus optimiste, les prochaines années verront probablement une cohabitation entre un processeur classique et un processeur quantique, ce qui permettra d'utiliser les avantages de chacun en fonction des besoins d'usage. À court terme, plusieurs dizaines de qubits, même imparfaits, pourront être utiles, notamment pour l'accélération de la résolution de problèmes d'optimisation, dont la commercialisation permettra d'engager des cycles vertueux d'investissement, indispensables pour le développement à long terme.

Sites Internet de l'OPECST :

<http://www.assemblee-nationale.fr/commissions/opepst-index.asp>

<http://www.senat.fr/opepst/>

Experts consultés

M. Alain Aspect, physicien à l'Institut d'Optique, membre du Conseil scientifique de l'Office.

Mme Astrid Lambrecht, directrice de recherche au CNRS, directrice de l'Institut de physique du CNRS (INP/CNRS), membre du conseil scientifique de l'Office.

Mme Fanny Bouton, journaliste spécialisée dans les nouvelles technologies.

M. Antoine Browaeys, directeur de recherche à l'Institut d'Optique.

M. Philippe Chomaz, directeur scientifique exécutif de la Direction de la recherche fondamentale au CEA.

M. Bruno Desruelle, PDG de la start-up Muquans.

M. Philippe Duluc, directeur technique big data & security d'Atos.

M. Daniel Estève, directeur de recherche et chef du groupe Quantronique au CEA.

M. Olivier Ezratty, consultant spécialisé en nouvelles technologies et auteur du blog "Opinion libres".

M. Philippe Grangier, Directeur de Recherche CNRS et Responsable du Groupe Optique Quantique à l'Institut d'Optique.

M. Serge Haroche, professeur émérite au Collège de France, prix Nobel de physique 2012.

M. Christophe Jurczak, directeur général du fonds d'investissement Quantonation.

M. Iordanis Kerenidis, directeur de recherche CNRS à l'Institut de recherche en informatique fondamentale (IRIF).

Mme Pascale Senellart, directrice de recherche au Laboratoire de photonique et nanostructures (LPN) du CNRS. Co-fondatrice de la start-up Quandela.

M. Miklos Santhas, directeur de recherche au Laboratoire d'Informatique Algorithmique : Fondements et Applications (LIAFA).

M. Sébastien Tanzilli, directeur de recherche et chargé de mission au CNRS sur les technologies quantiques.

M. Georges Uzelberger, AI/Advanced Analytics Solution chez IBM France.

M. Benoit Valiron, professeur assistant à Centrale Supélec.

M. Benoit Wintrebert, conseiller en Innovation au Ministère des Armées.

Contribution de M. Yann Michel, chercheur au CNRM/GMAP.

Contribution de M. Volker Beckmann, directeur adjoint scientifique calcul et données, Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules, CNRS.

Coordination scientifique de Mme Sarah Tigrine, conseillère scientifique (avec la participation de M. Gaëtan Douéneau).

Ouvrages de référence consultés :

- « Comprendre l'informatique quantique » O. Ezratty, novembre 2018 (e-book)

- Rapport des Académies américaines : National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2018. Quantum Computing : Progress and Prospects. The National Academies Press, Washington, DC. DOI : <https://doi.org/10.17226/25196>.

- « Clefs du CEA » N° 66- juin 2018 « révolutions quantiques »

Nota : en accord avec la déontologue de l'Assemblée nationale, Cédric Villani s'est mis en retrait de sa participation au Conseil scientifique d'ATOS – organe non décisionnel – pour la durée de ses travaux pour l'Office portant sur les technologies quantiques.

Références

- (1) Le marché mondial du calcul de haute performance (CHP ou, plus couramment utilisé, HPC en anglais) représente un chiffre d'affaires aujourd'hui estimé à environ 25-30 milliards d'euros avec une progression de +7 % par an, il pourrait atteindre 40 milliards d'euros en 2022.
- (2) À titre d'exemple, le supercalculateur américain Summit (93 petaflops) consomme en pic 15 MW soit l'équivalent de la consommation électrique de 7 000 foyers.
- (3) La gamme des prix moyen de vente des supercalculateurs fait l'objet d'une communication publique limitée, mais peut être estimée entre 10 et 200 millions d'euros.
- (4) Le modèle global de prévision de Météo-France (ARPEGE), intègre 9×10^8 (près d'un milliard) observations par mois, utilise environ 3 millions de lignes de codes pour produire plus de 10 To de données par jour. « [...] Météo France devrait multiplier sa puissance de calcul par cinq, grâce à l'acquisition d'un nouveau supercalculateur à partir de 2019, pour une mise en service en 2020. Cet investissement, indispensable pour permettre à Météo France de maintenir son rang, impliquera un effort annuel d'investissement consacré au calcul intensif de 12 à 29 millions d'euros sur la période 2019-2024. »
- (Source : Mission sénatoriale « Écologie, développement et mobilité durables », Programme 159 « Expertise, information géographique et météorologie », et budget annexe « Contrôle et exploitation aériens »
https://www.senat.fr/commission/fin/pjlf2018/np/np10c/np10c_mono.html#toc25)
- (5) En 1965, Gordon E. Moore (un des trois fondateurs d'Intel) énonçait ce que nous appelons maintenant la loi de Moore, à savoir que la densité des transistors (nombre de transistors par unité de surface) – dont découle la puissance de calcul des ordinateurs classiques – pourrait doubler tous les deux ans. Cette prédiction s'est révélée étonnamment exacte, et ces dernières années, les finesses de gravure n'ont cessé de diminuer jusqu'à atteindre 10 nm, ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) en 2017. Cependant, ces progrès atteignent des limites physiques du fait que l'on approche les dimensions de l'atome.
- (6) Dans un ordinateur, les bits sont manipulés à l'aide de composants électroniques, appelés transistors, qui possèdent deux états : passant (valeur 1) et bloquant (valeur 0). Les processeurs actuels contiennent de l'ordre du milliard de transistors.
- (7) Le terme « qubit », fusion des termes « quantique » et « bit », est apparu pour la première fois en 1995 dans une publication écrite par Benjamin Schumacher, physicien dans le domaine de la théorie de l'information quantique : « Quantum coding » Benjamin Schumacher, *Phys. Rev. A* 51, 2738 – Published 1 April 1995.
- (8) Voir la note n°13 de l'Office : « Les technologies quantiques : introduction et enjeux » http://www2.assemblee-nationale.fr/content/download/79022/810034/version/2/file/Note_TechnologiesQuantiques_Introduction_versionFinale.pdf
- (9) Capacité d'un corps quantique à se trouver dans des états différents en même temps. L'état global d'un système à un temps donné devient donc une combinaison linéaire de tous les états possibles à cet instant.
- (10) Lorsque deux particules distinctes (en l'occurrence deux qubits) sont intriquées, leurs états quantiques deviennent liés l'un à l'autre et ne peuvent pas être décrits séparément.
- (11) Si un qubit représente la superposition de 2 états, deux qubits décrivent 4 états possibles et trois qubits impliquent la superposition de 8 états... Ainsi pour N bits quantiques, il existe 2^N états possibles.
- (12) En informatique classique, les portes logiques (AND, OR, NAND, NOR...) décrivent les opérations de base sur les bits. Par exemple, la porte AND (« et » logique) combine 2 bits en entrée, et renvoie 1 si chacune des deux entrées vaut 1, et 0 dans les trois autres cas. Ces portes ont des analogues quantiques (porte Hadamard, Pauli, etc.), mais le comportement de ces dernières est bien plus complexe à décrire.
- (13) DiVincenzo, David P. "The physical implementation of quantum computation". *Fortschritte der Physik: Progress of Physics*, 2000, vol. 48, no 9-11, p. 771-783.
- (14) Le phénomène de décohérence traduit une perte de l'information quantique due à l'environnement du système. La fonction d'onde (l'état) du système est « brouillée » par les multiples interactions extérieures et finit par perdre son caractère ondulatoire et donc sa dimension quantique. La notion de décohérence a été mise en évidence en 1970 par le physicien Dieter Zeh et permet de mieux appréhender la frontière entre le monde quantique et classique : les objets classiques ne seraient en effet que des objets quantiques qui ont subi une décohérence par interaction avec leur environnement.
- (15) On ne peut pas simplement recommencer la mesure, car celle-ci aura détruit l'état quantique. En mécanique quantique, les observations effectuées sur un système modifient son état ; il est donc impossible de « lire » la valeur d'un qubit sans le détruire. Cette propriété pose plusieurs difficultés dans les algorithmes quantiques, mais elle constitue également une des clefs de la sécurité et de l'inviolabilité des protocoles de cryptographie quantique.
- (16) L'idée est ici similaire, mais en mécanique quantique, un état ne peut pas être dupliqué : étant donné un qubit, on ne peut pas observer sa valeur pour en faire une « copie de sauvegarde » identique. Cette difficulté est à l'origine de réponses complexes au problème de la correction des erreurs des qubits.
- (17) Monroe, Chris, Meekhof, D. M., King, B. E., et al. "Demonstration of a fundamental quantum logic gate". *Physical review letters*, 1995, vol. 75, no 25, p. 4714.
- (18) Les ions sont des atomes auxquels des électrons ont été ajoutés ou arrachés.
- (19) Un matériau supraconducteur n'oppose aucune résistance au passage d'un courant électrique et ne dissipe donc aucune énergie. Il fonctionne cependant à froid : à $-271,3 \text{ }^\circ\text{C}$ (1,8 degré au-dessus du zéro absolu).

(20) L'effet Josephson désigne l'apparition d'un courant entre deux couches supraconductrices, elles-mêmes séparées par un matériau non-supraconducteur, isolant ou conducteur. La mécanique quantique garantit « l'effet tunnel » entre ces deux couches, c'est-à-dire la capacité pour un électron de franchir la barrière de potentiel induite, même si son énergie est inférieure à l'énergie minimale nécessaire pour franchir cette barrière (jonction Josephson).

(21) Les transmons, dont le terme désigne des « *transmission-line shunted plasma oscillation qubit* », ont été développés à l'Université de Yale en 2007 (Koch, Jens, et al. "Charge-insensitive qubit design derived from the Cooper pair box." *Physical Review A* 76.4 (2007): 042319.).

(22) Une paire de Cooper permet de coupler, à très basse température, deux électrons dans un métal malgré la force répulsive due à leur charge électrique de même signe. Cette liaison entre deux électrons est à la base de la supraconductivité selon la théorie dite « BCS », du nom de ses inventeurs John Bardeen, John Schrieffer et Leon Cooper. Ces derniers furent récompensés par le Prix Nobel de physique en 1972 pour cette théorie.

(23) Une cavité (ou résonateur) micro-onde désigne une cavité à l'intérieur de laquelle une onde (ici dans la gamme des ondes micro-ondes, c'est-à-dire vers 2,5 GHz) entre en résonance avec les parois de la cavité.

(24) Ces circuits supraconducteurs sont appelés circuits QED (circuits *Quantum ElectroDynamics*). Le domaine de l'électrodynamique quantique a été développé par Serge Haroche, Prix Nobel de physique en 2012.

(25) <https://ai.googleblog.com/2018/03/a-preview-of-bristlecone-googles-new.html>

(26) Pour IBM, il s'agit d'un prototype opérationnel en test dans ses laboratoires qui devrait être mis en production pour ses clients à partir de fin 2019.

(27) C'est pourquoi IBM a introduit une métrique : « le volume quantique » qui permet de mesurer le degré d'usage d'une machine quantique en s'appuyant sur les paramètres combinés que sont le nombre de qubits, le taux d'erreur, la connectivité et le jeu de portes quantiques disponibles. (<https://www.zdnet.fr/actualites/informatique-quantique-ibm-assure-que-c-est-pour-les-annees-2020-39881483.htm>). C'est aussi une voie qu'explore Atos avec son simulateur QLM qui intègre les caractéristiques physiques de différentes technologies, ce qui permet de comparer leurs performances d'exécution sur un programme quantique de référence.

(28) Sous l'influence d'un champ magnétique, les électrons, assimilables à des charges électriques en rotation, se comportent comme des petits aimants et n'admettent que deux orientations possibles. C'est ce qu'on appelle le spin de l'électron, qui ne prend que deux valeurs possibles : *up* et *down* ou $+1/2$ et $-1/2$. Découvert en 1925, le spin fait maintenant partie des propriétés propres à une particule quantique au même titre que sa masse, sa position...

(29) Les machines vendues par D-Wave coûtent actuellement de l'ordre de 15 millions d'euros.

(30) <https://www.dwavesys.com/quantum-computing/applications>