



Opinions Libres

le blog d'Olivier Ezratty

Comprendre l'informatique quantique - supraconducteurs

Après avoir décrit l'offre de **D-Wave**, passons à celle des ordinateurs quantiques supraconducteurs à portes quantiques universelles. En effet, d'un point de vue physique, les ordinateurs adiabatiques de D-Wave et ceux de cette partie sont assez voisins, utilisant des variantes de l'effet Josephson dans des circuits supraconducteurs. La programmation et les capacités ne sont par contre pas du tout les mêmes.

Supraconducteurs universels

Les supraconducteurs occupent pour l'instant la voie royale de l'ordinateur quantique, étant exploités à la fois par D-Wave avec ses ordinateurs adiabatiques et par IBM, Google, Intel et Rigetti sans compter le CEA français qui planche dessus et est même à l'origine d'une bonne part des technologies de ce domaine.

Dans le quantique universel, ce sont les ordinateurs qui scalent le mieux pour l'instant, même si le résultat est modeste avec un record en date de 72 qubits pour Google, qui n'est pour l'instant pas documenté au niveau du taux d'erreurs.

Dans les qubits supraconducteurs, la circulation du courant est contrôlée par des portes à effet Josephson qui s'ouvrent en fonction de l'application d'un champ magnétique externe. C'est une sorte de robinet, un peu comme la base d'un transistor bipolaire.

Il existe en fait plusieurs types de qubits supraconducteurs. Ils diffèrent par la manière d'encoder l'information quantique avec deux états bien distincts. C'est bien expliqué dans **Practical realization of Quantum Computation** (36 slides) ainsi que dans une **conférence de Serge Haroche** du Collège de France de 2011 (mais il faut s'accrocher...).

On distingue donc plusieurs types de qubits supraconducteurs :

- Qubits de flux : leur état correspond au sens de circulation du courant supraconducteur dans sa boucle. C'est le plus facile à comprendre et à visualiser. La mesure de l'état d'un tel qubit utilise un SQUID (superconducting quantum interference device), un magnétomètre qui va être capable de mesurer le sens du courant dans le qubit, donc son état 0 ou 1. C'est l'approche de D-Wave, de Rigetti, du MIT et de TU-Delft aux Pays-Bas.
- Qubits de charge / transmon : leur état correspond à des seuils de passage de courant dans la jonction Josephson de la boucle supraconductrice. De petites jonctions Josephson délimitent un îlot supraconducteur avec une charge électrique bien définie. Les états de base de tels

qubits de charge sont les états de charge de l'îlot en couples d'électrons supraconducteurs appelés paires de Cooper. Ces qubits sont alimentés par des oscillateurs harmoniques utilisant des radio-fréquences allant de 5 à 10 GHz qui leur sont transmises par fils conducteurs électriques. L'approche d'IBM est une variante de qubit de charge dénommée transmon. Google utilise aussi des transmons. C'est aussi l'approche du CEA à Saclay qui en est d'ailleurs à l'origine.

- **Qubits de phase** : ils utilisent des jonctions Josephson plus grandes que dans les qubits de charge. L'état du qubit correspond à deux niveaux d'énergie de courants dans une jonction Josephson. Cette approche est expérimentée par le NIST aux USA.

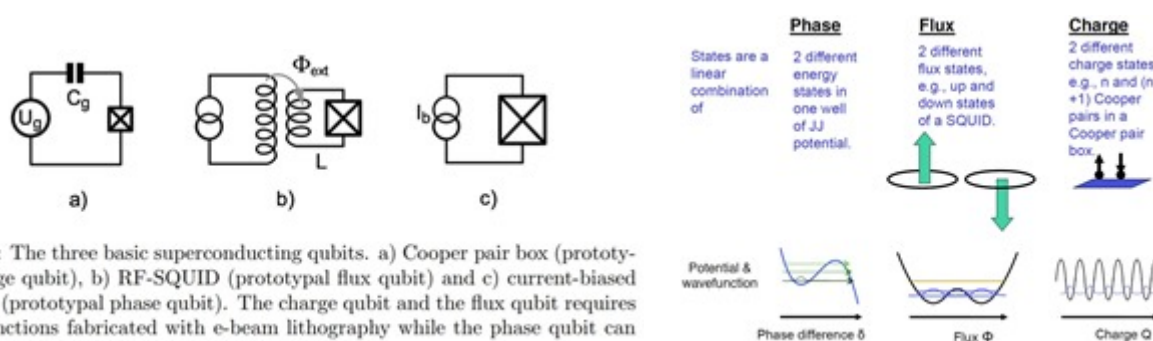


Figure 4: The three basic superconducting qubits. a) Cooper pair box (prototypal charge qubit), b) RF-SQUID (prototypal flux qubit) and c) current-biased junction (prototypal phase qubit). The charge qubit and the flux qubit requires small junctions fabricated with e-beam lithography while the phase qubit can be fabricated with conventional optical lithography.

Source du second schéma : **Flux Noise in Superconducting Qubits** (44 slides).

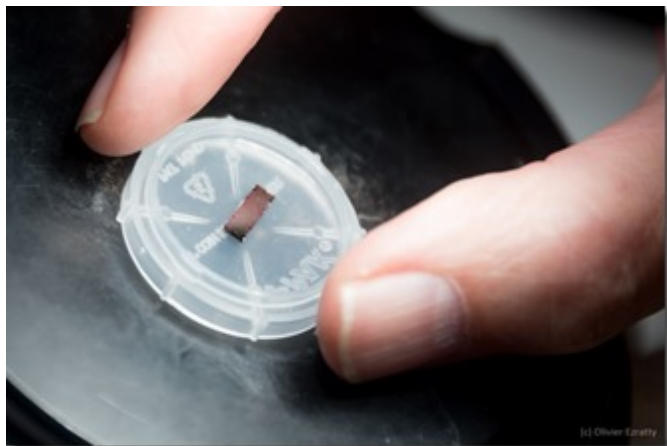
Les limitations technologiques sont liées à la taille des qubits qui est de l'ordre du micron, ce qui rend difficile la création de grandes puces avec des millions de qubits, à la place qui est prise par contrôleurs utilisant des radiofréquences allant jusqu'à 10 GHz qui poserait encore plus de problèmes avec l'augmentation du nombre de qubits, au taux d'erreurs des qubits, aux limites des systèmes de cryogénie qui sont limités en capacité, notamment au niveau de la dimension des disques métalliques qui supportent les systèmes à chaque étage du "frigo". Divers travaux visent à prouver que l'on peut miniaturiser une partie de ces circuits de contrôle des qubits supraconducteurs mais ils ne semblent pas avoir aboutit à ce stade à des réalisations concrètes.

Ceci étant, les progrès sont constants dans la réduction du bruit des qubits dans cette technologie. Ce bruit a plusieurs origines comme les fluctuations de charge, les électrons baladeurs, les impuretés dans les matériaux notamment comportant des atomes d'oxygène et les perturbations magnétiques, ce qui explique pourquoi les ordinateurs quantiques comme ceux de D-Wave sont isolés dans des cages de Faraday avec jusqu'à 16 couches de protection contre les perturbations magnétiques.

Pour ce qui est de la mesure de l'état des qubits supraconducteurs, une équipe de chercheurs canado-américaine a publié en 2015 **Heisenberg-limited qubit readout with two-mode squeezed light** (12 pages) qui propose une méthode optique de mesure miniaturisable.

Les qubits supraconducteurs utilisent sinon souvent du **niobium** pour ses portes à effet Josephson, qui peut être remplacé par de l'**aluminium**, utilisé notamment chez Rigetti. Le niobium est un métal qui n'est pas rare. Sous-produit de l'extraction de minerais, il est généré à raison de plus de 60 000 tonnes par an, provenant essentiellement du Canada et du Brésil. Il est surtout utilisé dans des alliages spéciaux ainsi que dans les aimants supraconducteurs comme dans ceux de l'accélérateur de particules géant LHC du CERN à Genève.

D'un côté historique, les premières boîtes de paires de Cooper ont été créées expérimentalement en 1997 au CEA de Saclay par Vincent Bouchiat. NEC a créé le premier qubit supraconducteur en 1999. Le laboratoire de Daniel Estève au CEA Saclay a créé son premier qubit supraconducteur en 2002. Ci-dessous, Daniel Esteve présentant ce premier qubit supraconducteur (à moins que cela soit le premier chipset à deux qubits...). Le premier processeur complet intégrant deux qubits supraconducteurs est arrivé en 2012.



Comme les paires de Cooper sont l'un des rares ensembles de particules qui sont des bosons, ils peuvent être condensés dans le même état quantique, ce qui permet à un qubit de charge ou de flux d'avoir une propriété quantique "macro" de plusieurs (des millions) quantums, ces paires de Cooper.

L'équipe de physiciens de Daniel Estève au CEA de Saclay continue de travailler sur les qubits supraconducteurs tendance transmon avec en ligne de mire la création de qubits plus stables et générant moins d'erreurs. C'est une approche de recherche long terme qui fait partie du champ de la physique de la matière condensée. En d'autres termes, de la matière à très basse température.

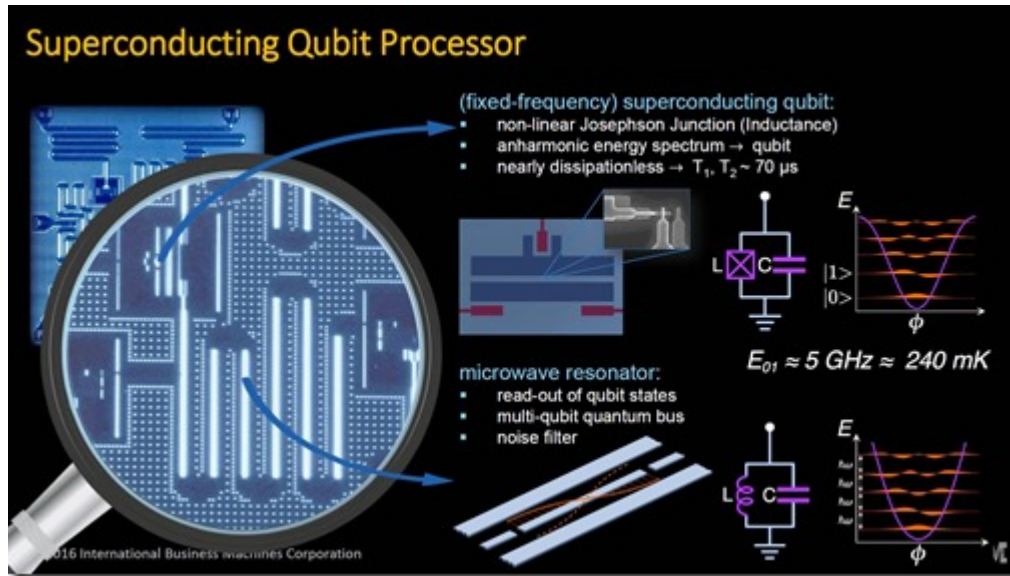
Pour en savoir plus sur les qubits supraconducteurs et les défis de leur mise au point, voir notamment cette excellente présentation du MIT : **Quantum Engineering of Superconducting Qubits**, 2018 (58 slides) ainsi que **Quantum Physics with Superconducting Qubits** de Andreas Wallraff, de l'ETH Zurich, 2016 (49 slides).



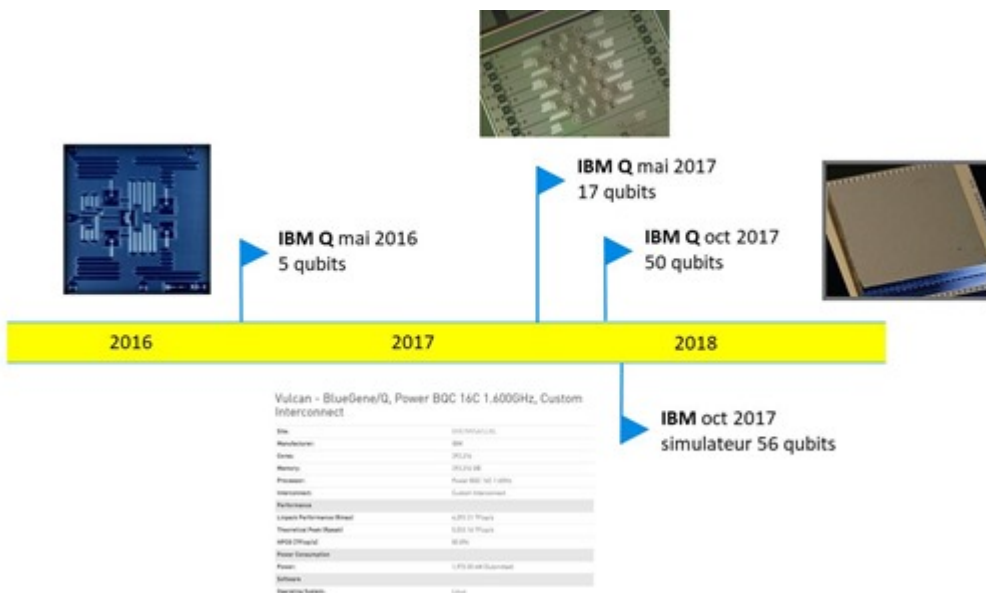
IBM est un des rares grands acteurs du numérique qui investit dans la recherche fondamentale et depuis très longtemps. Qui fait de la recherche fondamentale ? Principalement IBM, Microsoft, Google, les équipementiers et les opérateurs télécoms. Les Bell Labs issus du démantèlement d'AT&T en 1982 font maintenant partie de Nokia après être passée par Lucent et Alcatel-Lucent. Le reste des acteurs, tels que Apple se contente de créer des produits. Facebook fait un peu de recherche fondamentale en IA.

A ce titre, IBM est l'un des plus avancés dans la recherche sur le quantique universel, ayant tout

misé sur les supraconducteurs à effet Josephson. Les efforts d'IBM dans le quantique sont sous l'aile de la marque IBM Q. Ils sont pilotés par les chercheurs de leur site de Yorktown dans l'Etat de New York, en liaison avec différents laboratoires d'IBM dans le monde dont celui de Zurich, avec des universités américaines et avec l'Université ETH Zurich.



En trois ans, IBM a fait évoluer rapidement le nombre de qubit de ses prototypes d'ordinateurs quantiques. On est ainsi passé de 5 Qubits en 2016 ([vidéo](#)) à 50 qubits fin 2017. Leurs efforts portent surtout sur la réduction du bruit pouvant affecter la qualité des calculs quantiques. Ils travaillent aussi sur l'utilisation de "surface codes", ces arrangements de qubits en matrices qui permettent de gérer la correction des erreurs.



IBM propose ses qubits dans le cloud. Ils avaient démarré avec 5 qubits en 2016, puis étaient passés à 16 qubits et en sont à 20 qubits, depuis novembre 2017 ([source](#)). Ils proposent un outil graphique en ligne de création de son algorithme quantique (*ci-dessous*, avec la version 5 qubits lancée en 2016). Voici un **petit tutoriel de programmation** utilisant le SDK open source Qiskit qui supporte de son côté le langage de bas niveau **OpenQASM** qui pilote les qubits d'IBM. Voir aussi cette **vidéo de vulgarisation** de haut niveau par Talia Gershon. Les qubits d'IBM dans le cloud sont déjà utilisés par des milliers de chercheurs, entrepreneurs et étudiants dans le monde.

Ceci étant, les qubits d'IBM ont été benchmarkés par Kristel Michielsen dans **Benchmarking gate-based quantum computers**, 2017 et leur qualité semble bien faible. En particulier, les portes CNOT semblent générer un fort taux d'erreurs.

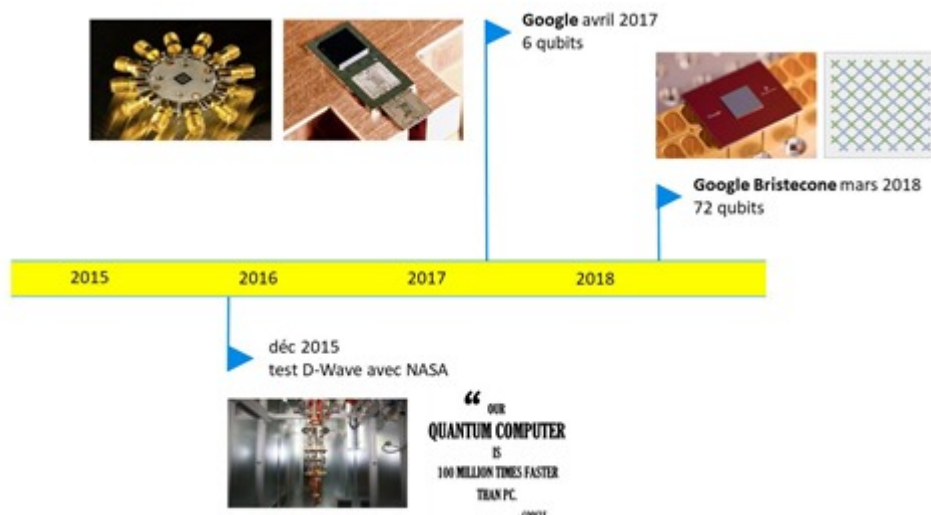


IBM battait aussi un record de simulation numérique de 56 qubits en 2017, sur un supercalculateur classique de leur cru, le Vulcan BlueGene installé au Lawrence Livermore National Laboratory en Californie (source : **IBM Simulates a 56-Qubit Machine**, 2017). La performance est documentée dans **Breaking the 49-Qubit Barrier in the Simulation of Quantum Circuits**, 2017 (24 pages). 56 qubits est d'ailleurs le record en date de simulation de qubits dans un supercalculateur.



Google a trois fers au feu pour ce qui est du calcul quantique. Il offre d'abord des capacités de simulation d'algorithmes quantiques sur ses serveurs traditionnels, puis teste des algorithmes sur des D-Wave dans le laboratoire QUAIL conjoint avec la NASA situé au Ames Research Center de Mountain View, et enfin, planche sur son propre ordinateur quantique universel à base de qubits supraconducteurs, en partenariat avec l'Université de Santa Barbara en Californie d'où provient John Martinis qui pilote l'activité quantique de Google.

Comme IBM, ils cherchent à en augmenter le nombre tout en diminuant le taux d'erreur. Le géant de Mountain View n'est pas un fournisseur de supercalculateurs. Il prévoit sans doute d'utiliser ses ordinateurs quantiques pour ses propres besoins destinés aux usages grand public et pour ses offres de cloud computing destinées aux entreprises. Cela pourra aussi servir plus largement aux autres filiales du groupe Alphabet et en particulier celle qui travaille dans la santé, Verily, qui sera très intéressée par les capacités de simulation moléculaires du quantique, pour inventer de nouveaux traitements.



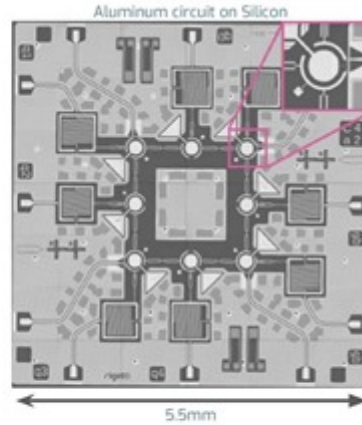
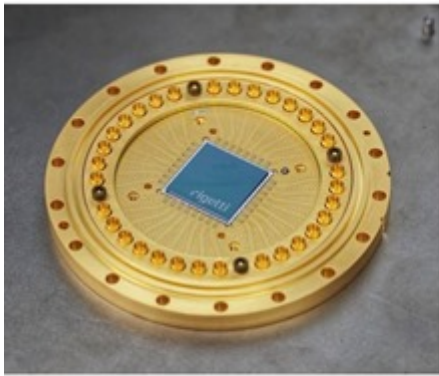
Google a fait régulièrement évoluer le nombre de qubits de ses prototypes d'ordinateurs quantiques. En avril 2017, on en était à 6 qubits. En juin 2017, Google annonçait vouloir atteindre 49 qubits stables. Et en mars 2018, c'était le tour d'une annonce d'un record de 72 qubits avec la génération Bristlecone, promettant un taux d'erreurs inférieur à 0,5% dans les paires de qubits couplées entre elles. Mais ce record n'a pas encore donné lieu à une publication scientifique vérifiable et il leur faudra probablement encore quelques mois pour mettre cela au point. Et la communication scientifique aura intérêt à être précise, faisant la part des choses entre le taux d'erreur des qubits individuels, celui des portes reliant des paires de qubits, sur la manière dont les qubits sont reliés entre eux, sur le temps de cohérence des qubits ainsi que sur la durée d'exécution des portes quantiques. Google communiquait d'ailleurs un peu trop rapidement sur l'avènement rapide de la fameuse suprématie quantique.

Du côté logiciel, nous avons déjà vu dans la partie dédiée aux outils de développement que Google proposait d'un côté Circ, un outil de programmation de bas niveau, complété par OpenFermion, un framework de plus haut niveau codéveloppé avec Rigetti, et dédié notamment à la simulation de l'interaction entre atomes.

rigetti

Rigetti est le troisième larron du supraconducteur universel "commercial". Ils en sont actuellement à 19 qubits avec leurs chipsets avec une version à 128 qubits en cours de mise au point, annoncée début août 2018.

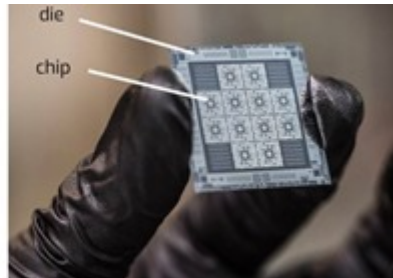
Avec D-Wave, c'est la seconde startup la mieux financée du secteur, ayant levé en tout \$69,5M. La startup a été lancée par Chad Rigetti en 2013. Ce dernier avait obtenu une thèse de doctorat à l'Université de Yale sur les qubits supraconducteurs en 2009, **Quantum Gates for Superconducting Qubits** (248 pages).



Circuit Quantum Electrodynamics (cQED) à 8 qubits
supraconducteurs à 10 mK et jonctions Josephson

Il est difficile d'apprécier la manière dont Rigetti fait avancer l'état de l'art avec ses qubits supraconducteurs. Leur nombre est en ligne avec ceux d'IBM. Ils communiquent peu sur leur taux d'erreur et temps de cohérence.

Comme IBM et D-Wave, ils ont une approche d'intégration verticale. Cela va jusqu'à leur propre petite unité de fabrication pour leurs chipsets maison. Ils peuvent se le permettre car l'équipement revient à environ \$10M, ce qui est raisonnable. Ce coût modéré vient de ce que la création de circuits de qubits supraconducteurs se fait avec un niveau d'intégration très faible. Dans le cas de qubits CMOS, il faut par contre disposer d'un équipement d'au moins \$1B ! Voir **Quantum Cloud Computing Rigetti** de Johannes Otterbach, 2018 (107 slides) et la **vidéo correspondante**.



Leurs outils de développement proposés par Rigetti comprennent pyQuil pour le scripting et Quil pour la gestion des portes quantiques. Ils sont tous deux open source et publiés sur Github. Quil permet de synchroniser des tâches sur la partie quantique et la partie traditionnelle de l'ordinateur (**documentation**), ce qui en soi, n'a rien d'extraordinaire par rapport à l'approche des autres acteurs de ce marché.

FOREST: Tools for experimental quantum programming

forest.rigetti.com

> Write applications...

APPLICATIONS: Grove

> using tools...

DEVELOPMENT: pyQuil

> that build quantum programs...

QUANTUM INSTRUCTION LANGUAGE: Quil



Client

Open-sourced on github
under Apache v2.0 license

github.com/rigetticomputing/pyquil

github.com/rigetticomputing/grove

> that compile onto quantum hardware...

COMPILER

> that execute on a real or virtual quantum processor.

QUANTUM VIRTUAL MACHINE / QUANTUM COMPUTER



Server

Simulator in public-beta
Quantum HW

forest.rigetti.com

Robert Smith, Michael Curtis, William Zeng. *A Practical Quantum Instruction Set Architecture*. arXiv:1608.03355

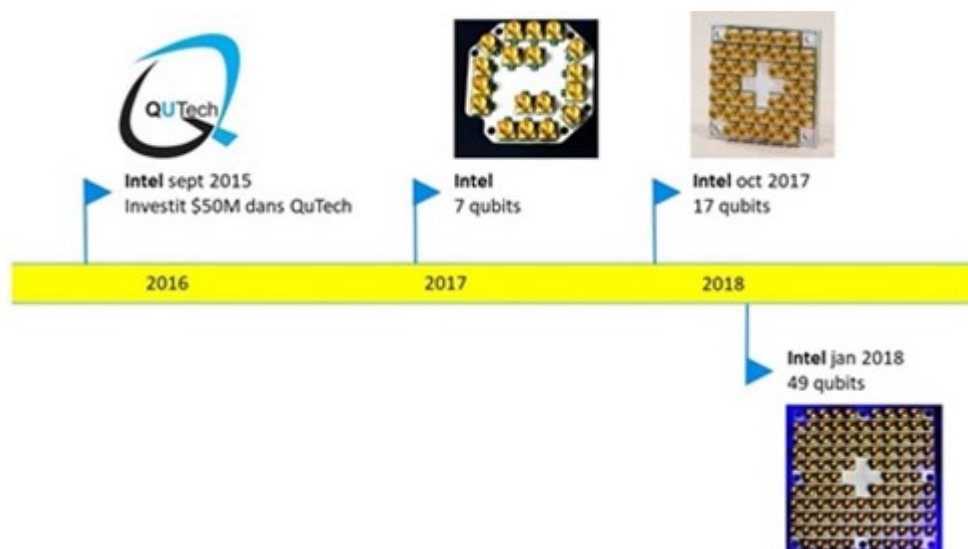
Côté “Go to market”, Rigetti prévoit de proposer l'accès à ses ordinateurs quantiques via le cloud, un peu comme le fait IBM et devraient le faire Google et Microsoft.



Au CES 2018, le CEO d'Intel avait fièrement brandi un chipset de 49 qubits lors de son keynote dans la grande salle de l'hôtel Monte Carlo, entre une démonstration de drone de passager et un discours sur l'intelligence artificielle. Ce processeur en technologie supraconductrice était impressionnant mais ne semble pas encore opérationnel. Dénommé Tangle Lake, ce chipset utilise une technologie supraconductrice voisine de celles d'IBM et Google. Il est en cours de test chez **Qutech** aux Pays-Bas;

Il représente un enjeu clé pour Intel qui devrait éviter de rater cette grande vague technologique qu'est l'informatique quantique. Ils ont raté celle du mobile et ne sont pas bien en point dans l'intelligence artificielle face à Nvidia qui leur taille des croupières.

Intel a plusieurs fers au feu dans le quantique. Ils creusent à la fois la piste des qubits supraconducteurs et ont présenté à ce jour plusieurs puces allant jusqu'à une cinquantaine de qubits comme Tangle Lake, et celle des qubits CMOS, que nous évoquerons dans la prochaine partie, qui s'appuiera sur leur savoir-faire en industrialisation de production de composants de ce type, un savoir qui est rare et cher dans l'industrie.



Leurs chipsets quantiques supraconducteurs évoluent à un rythme voisin de ceux de Google et IBM dans les supraconducteurs. Ils en étaient ainsi à 7 qubits fin 2016, 17 qubits fin 2017 puis 49 qubits présentés en janvier 2018, tous en supraconducteurs. Ces chipsets doivent être refroidis à 20 mK. Intel pense pouvoir monter la température opérationnelle à 1K, ce qui réduirait les exigences et le coût du refroidissement. Mais on ne sait pas comment, à part, via la filière CMOS que nous évoquerons dans la prochaine partie.

Dans la **partie suivante**, nous ferons le tour des autres acteurs avec les ordinateurs quantiques CMOS, à base de NV Centers (cavités de diamants), en optique linéaire et à base d'architectures topologiques.

Cet article a été publié le 17 août 2018 et édité en PDF le 6 septembre 2020.
 (cc) Olivier Ezratty - "Opinions Libres" - <https://www.oezratty.net>