



Opinions Libres

le blog d'Olivier Ezratty

Comprendre l'informatique quantique – adiabatique

Après avoir brossé un **tableau général des acteurs du marché des ordinateurs quantiques** dans cette longue série estivale destinée à décrypter le complexe monde de l'informatique quantique, nous allons creuser l'offre des ordinateurs quantiques adiabatiques utilisant le recuit quantique.

Le recuit quantique, “quantum annealing” en anglais, est une technologie particulière d'ordinateur quantique qui repose bien sur la mécanique quantique et des qubits, mais avec des caractéristiques et niveaux de performance intermédiaires entre ceux des supercalculateurs traditionnels et ceux des ordinateurs quantiques universels. Il n'existe qu'un seul acteur commercial sur ce marché : le Canadien **D-Wave**. Le principe général consiste à établir des liaisons entre qubits avec des poids, comme dans des réseaux de neurone du deep learning, puis à faire trouver un point d'équilibre au système en modifiant ces poids pour identifier un minimum énergétique de l'ensemble. Ce minimum doit correspondre à la solution recherchée du problème. Le processus est dit adiabatique car il n'y a pas de transfert énergétique entre le chipset de l'ordinateur et son environnement.

Côté recherche, cette voie est aussi explorée par la Advanced Research Projects Agency (IARPA), qui fait partie de l'Office of the Director of National Intelligence (ODNI) qui coordonne le renseignement américain à la Maison Blanche. C'est intégré dans le projet **Quantum-Enhanced Optimization (QEO)** qui vise à créer un calculateur adiabatique n'ayant pas certaines des limitations de ceux de D-Wave, notamment en termes de connectivité et de qualité des qubits employés. Comme il se doit au vu de la mission de l'IARPA, l'objectif est d'accélérer la mise en production d'ordinateurs quantiques capables d'exécuter l'algorithme de Shor de factorisation de nombre entiers pour casser la sécurité à clés publiques de communications interceptées.

Je cite également ici le Japonais **Fujitsu** qui annonçait début juin 2018 un ordinateur à recuit digital fonctionnant à température ambiante, mais sans faire appel à du quantique. Il concurrence directement l'offre de D-Wave mais avec une solution qui semble plus simple à mettre en œuvre.



Situé à Vancouver, le Canadien D-Wave est le seul fournisseur d'ordinateurs quantiques commerciaux à ce jour, en mettant de côté ceux qui proposent l'accès à des ordinateurs quantiques limités en nombre de qubits dans le cloud. Même s'il s'agit d'ordinateurs adiabatiques présentant des limitations techniques par rapport aux ordinateurs quantiques universels, ils ont l'avantage d'exister, de faire avancer le secteur et de permettre le test d'algorithmes quantiques dans une large gamme d'applications. Celles-ci semblent cependant demeurer des “proofs of concept” d'après les études de cas publiées.

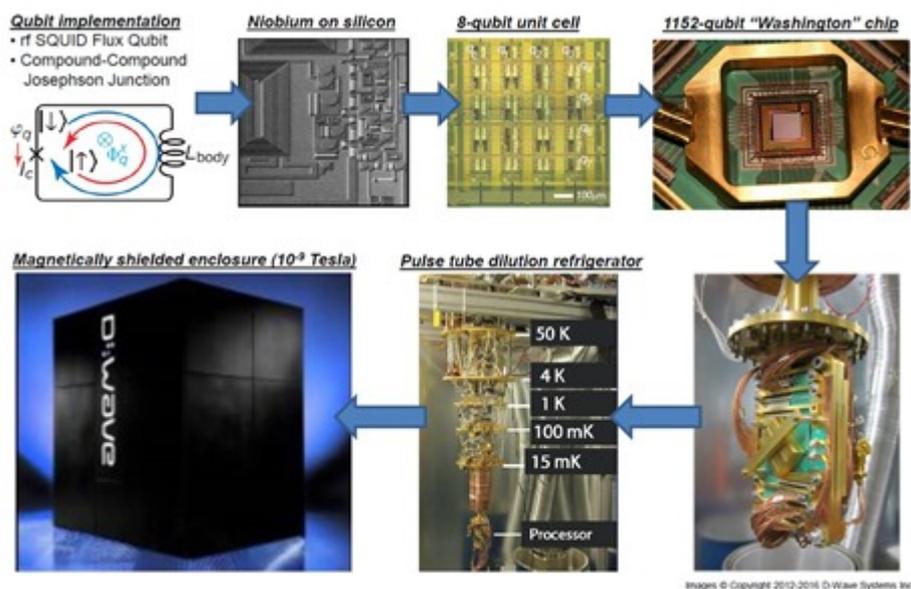
L'histoire de cette startup qui a levé \$194M est fascinante pour ce qui est du timing. Créée en 1999, elle met 8 ans à prototyper sa première puce de qubits, contenant 4 qubits. Il leur faut en tout 10 ans pour vendre un premier ordinateur quantique. Quelle patience pour leurs investisseurs ! Pendant ces 10 ans, ils lèvent \$31M. Ils

obtiennent ensuite un financement de \$1,2M en 2012 de la part d'InQTel, le fonds d'investissement de la CIA. Les levées de fonds suivantes, dont une partie est en obligations convertibles, leur permettent de tenir le coup, en plus des premières commandes dont certaines sont publiques et d'autres confidentielles. Ces dernières viennent au minimum de la NSA, si ce n'est d'autres services de renseignement occidentaux, probablement chez les partenaires de l'alliance "five eyes" que sont les pays du Commonwealth comme UK, l'Australie, le Canada et la Nouvelle-Zélande. En 2011, D-Wave signait d'ailleurs un partenariat avec Lockheed Martin, qui travaille beaucoup pour la NSA. En tout, la startup a obtenu 13 tours de financements !

D-Wave a été créé par Geordie Rose (leur premier CTO et un moment CEO), Haig Farris, Bob Wiens et Alexandre Zagoskin, anciennement en charge de la recherche. Geordie Rose a obtenu un doctorat en physique des matériaux au milieu des années 1990 à l'University of British Columbia. La création de D-Wave est donc en ligne droite de ces travaux. Il rencontra Haig Farris pendant ses études alors que ce dernier enseignait l'économie.

L'équipe de direction de D-Wave de 2018 n'a plus grand chose à voir avec celle de ses créateurs. Un seul des cofondateurs en fait encore partie, Eric Ladizinsky, qui joue un rôle de Chief Scientist. Le CEO depuis 2009 est Vern Brownell et le Président est Bo Ewald (qui intervenait à VivaTech 2018), en charge du business development à l'international. Leur CTO est un certain Alan Baratz qui a rejoint la société en 2017. On sent une forme de reprise en main.

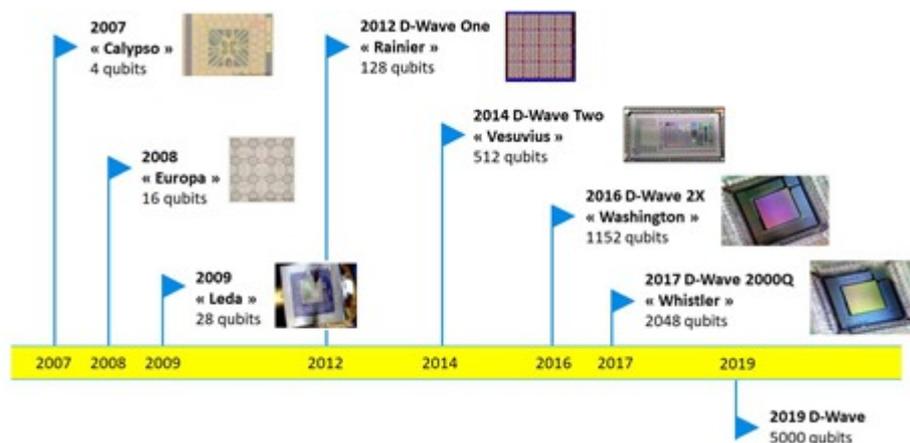
Le cofondateur Geordie Rose a ensuite créé **Kindred.ai**, une startup qui vise à intégrer une intelligence générale (AGI) dans les robots. Il est devenu un véritable "singulariste". Ses interventions publiques sont assez déjantées. Il s'exprime ainsi sur les **démons** et sur les **extraterrestres**. Il quitte Kindred.ai début 2018 pour créer **Sanctuary**, une spin-off de Kindred, dédiée à l'AGI, la quête du Graal de l'intelligence artificielle générale !



D-Wave a développé sa solution de bout en bout d'ordinateur adiabatique à recuit quantique. Cela commence avec les puces quantiques, puis va jusqu'à l'ordinateur complet avec une enceinte de 16 couches de protection magnétique plus un système de réfrigération utilisant de l'hélium 3 et 4 liquide, dont la combinaison est nécessaire pour atteindre les 10 à 20 mK (milli-Kelvin, sachant que $0K = -273,15^\circ C$). Le système de cryogénie consomme environ 20KW. C'est à peu près l'essentiel de la consommation électrique de l'ordinateur qui s'élève au total à 25 KW. Les 5K qui restent sont surtout liés aux systèmes de contrôle informatique traditionnels qui sont externes à l'unité quantique de l'ordinateur. Un ordinateur quantique, hors refroidissement présente en effet la particularité d'être plutôt économe en énergie, surtout en comparaison de

leurs équivalents dans les supercalculateurs.

Leur roadmap a avancé régulièrement avec les trois premières générations de prototypes entre 2007 et 2009 puis, à partir de 2012, quatre générations d'ordinateurs commerciaux, à commencer par le D-Wave One en 2012 avec ses 128 qubits et jusqu'au D-Wave 2000Q de 2017 avec ses 2048 qubits et 5600 coupleurs reliant les qubits par paires et 128 000 jonctions Josephson. La prochaine génération est attendue aux alentours de 2019 avec 5000 qubits et un décuplement de la puissance provenant notamment d'une amélioration de la connexion entre qubits. Les chipsets de D-Wave sont fabriqués aux USA dans une unité de production de composants du Californien **Cypress Semiconductors**. Le D-Wave 2000Q est commercialisé au prix catalogue de \$15K.



Le principe de base de l'ordinateur quantique adiabatique consiste à préparer ce que l'on appelle un "hamiltonien", un système quantique avec plusieurs qubits interconnectés. Cet hamiltonien est initialisé dans un état qui est proche de la solution du problème que l'on souhaite résoudre. L'ordinateur va alors faire évoluer cet hamiltonien de façon adiabatique vers le hamiltonien de la solution du problème posé en respectant un grand nombre de contraintes préalables que je ne vais pas décrire ici.

Cela relève de la recherche d'un minimum énergétique. Elle est facilitée par l'effet tunnel quantique qui permet au système de trouver facilement des minimums globaux au lieu d'être coincé dans des minimums locaux, un problème qui rappelle celui de la descente de gradient dans l'entraînement de réseaux de neurones.

Ce type d'ordinateur est capable de résoudre des problèmes dits NP-complets, une catégorie des problèmes de logique qui théoriquement résolus dans un temps polynomial mais qui le sont en pratique en temps exponentiel. Je vous passe les détails sur les débats sur les problèmes P, NP, NP-complet et sur l'équivalence recherchée entre problèmes P et NP ! C'est le cas des problèmes de routage, de définition de parcours de voyageurs du commerce et équivalents. En théorie, les algorithmes conçus pour des ordinateurs quantiques universels avec des portes quantiques exécutées séquentiellement peuvent être convertis en algorithmes exécutables sur ce type d'ordinateur et réciproquement. C'est documenté dans **Adiabatic quantum computation is equivalent to standard quantum computation**, 2005 (30 pages) que nous avons déjà cité dans une **partie précédente** portant sur la complexité des problèmes gérables par des ordinateurs quantiques ainsi que dans **How Powerful is Adiabatic Quantum Computation?** de Wim van Dam, Michele Mosca et Umesh Vazirani, 2001 (12 pages).



D-Wave Two	D-Wave 2X	D-Wave 2000Q
512 (8x8x8) qubit "Vesuvius" processor	1152 (8x12x12) qubit "Washington" processor	2048 (8x16x16) qubit "Whistler" processor
509 qubits working – 95% yield	1097 qubits working – 95% yield	2038 qubits working – 97% yield
1472 J programmable couplers	3360 J programmable couplers	6016 J programmable couplers
20 mK max operating temperature (18 mK nominal)	15 mK max operating temperature (13 mK nominal)	15 mK max operating temperature (nominal to be measured)
5% and 3.5% precision level for h and J	3.5% and 2% precision level for h and J	To be measured
20 us annealing time 12 ms programming time	5 us annealing time (4X better) 12 ms programming time	5 us annealing time 9 ms programming time (25% better) New: anneal offset, pause, quench
6 graph connectivity per qubit	6 graph connectivity per qubit	6 graph connectivity per qubit

Les qubits des ordinateurs de D-Wave ont la particularité d'être connectés à leurs voisins immédiats, pas à l'ensemble des qubits du système. Mais ils peuvent tout de même être mis en cohérence avec de nombreux qubits distants. C'est une architecture que l'on retrouve cependant dans certains qubits supraconducteurs universels. Elle présente divers inconvénients comme une montée en puissance qui n'est pas exponentielle avec l'ajout de qubits, mais dite quadratique, soit, en fonction de la racine carrée de leur nombre. Elle n'offre donc pas les améliorations de performance qui sont apportées par les ordinateurs quantiques universels. Cf à ce sujet **Limits of quantum computing** de Jon Borwein (2016).

L'initialisation du D-Wave 2000Q dure 25 ms, le temps de convergence du système (annealing) est de 20 microsecondes (?s) et le temps de lecture dure 260 microsecondes, ces deux étapes étant généralement répétées plusieurs fois et les résultats moyennés, une pratique qui ne semble pas être de rigueur avec les ordinateurs quantiques à portes universelles.

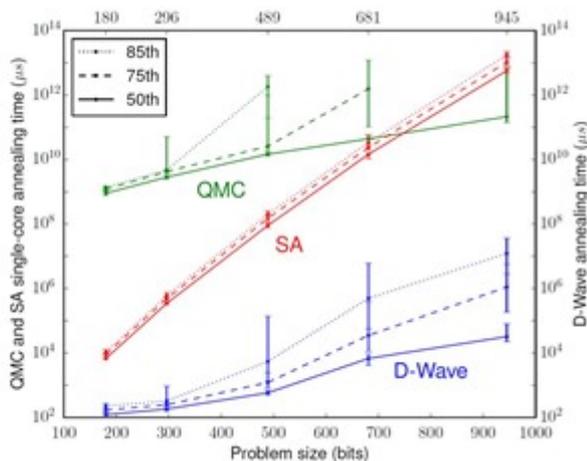
Selon John Preskill dans **Quantum Computing for Business**, 2017 (41 slides), il n'existe pas de base théorique convaincante de l'avantage du recuit quantique qui est une des formes d'ordinateur quantique adiabatique. Selon lui, cette architecture n'est pas théoriquement aussi scalable que les ordinateurs quantiques universels. Qui plus est, un même algorithme va demander beaucoup plus de qubits avec D-Wave qu'avec un ordinateur quantique universel, sachant que le rapport actuel est de 2048 vs 50 côté disponibilité, ce qui égalise les choses.

Comme tous les grands acteurs du quantique, D-Wave a développé une plateforme logicielle supportant les couches basses de la création d'algorithmes quantiques pour ses machines. Ils ont aussi quelques partenaires logiciels comme **1QBit**. Les outils proposés comprennent à haut niveau Qsage, un outil qui sert à définir des problèmes d'optimisation, ToQ, un outil équivalent pour la programmation par contraintes, puis à un niveau intermédiaire, qbsolv qui permet de distribuer un problème complexe sur plusieurs passes de D-Wave et au niveau le plus bas, les instructions QMI pour piloter les qubits. Ils proposent aussi Quadrant, un framework permettant de préparer des D-Wave pour résoudre des problèmes de machine learning.

Comme les ordinateurs D-Wave sont les seuls qui soient utilisés chez des clients, les études de cas d'usage sont les plus nombreuses, même si elles sont assez exotiques et relèvent le plus souvent de "proof of concepts". La plus connue est celle Google et de la NASA réalisée avec un D-Wave de 2013 pour la résolution d'un problème d'optimisation et de combinatoire dans un graphe dont l'algorithme avait été conçu en 1994.

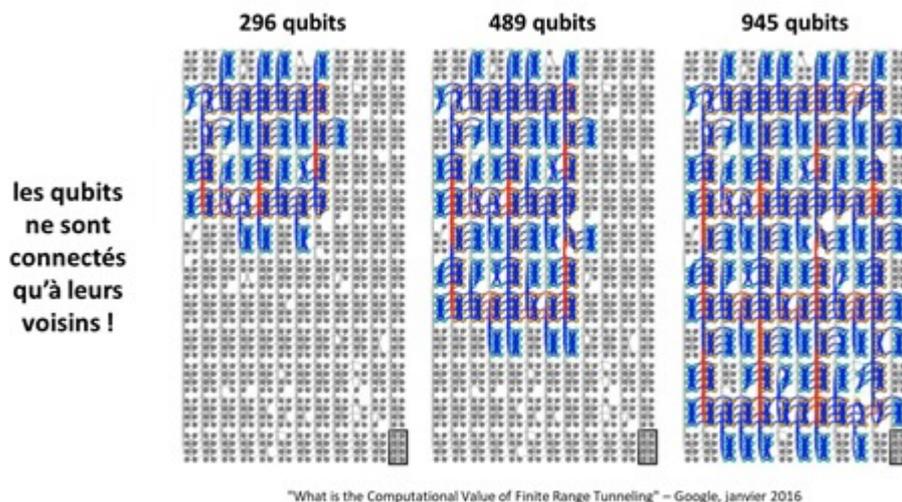


“OUR
QUANTUM COMPUTER
IS
100 MILLION TIMES FASTER
THAN PC.
- GOOGLE



La performance affichée par Google et documentée dans *What is the Computational Value of Finite Range Tunneling* (17 pages) était 100 millions de fois supérieure à celle d'ordinateurs traditionnels. Les éléments de comparaison portaient sur deux algorithmes leur étant destiné le “simulated annealing”, simulant l'ordinateur D-Wave sur ordinateurs classiques et une QMC (Quantum Monte Carlo) optimisée pour ordinateur traditionnel, et qui donne de meilleurs résultats en termes de montée en puissance que l'émulation du quantique sur HPC. Les critiques ont été nombreuses sur cette performance, dont *Temperature scaling law for quantum annealing optimizers*, 2017 (13 pages), qui pointe les limitations du recuit quantique.

Le layout physique de qubits utilisé pour résoudre ce problème exploitait respectivement 296, 489 et 945 qubits, comme illustré *ci-dessous*.



D-Wave communique sur quelques-unes de ses références :

- Chez l'équipementier japonais **Denso**, présentée au CES 2017 de Las Vegas, qui sert à gérer l'optimisation d'une flotte de véhicules de livraison de Toyota.
- Avec **Volkswagen** pour gérer l'exploitation d'une flotte de taxis à Beijing et pour mettre au point de nouvelles batteries (source).



optimisation de trafic
exploitation de la position
de 10 000 taxis à Beijing.

DENSO

optimisation de flotte
Denso et Toyota, présentée
au CES 2017 sur le stand de Denso.



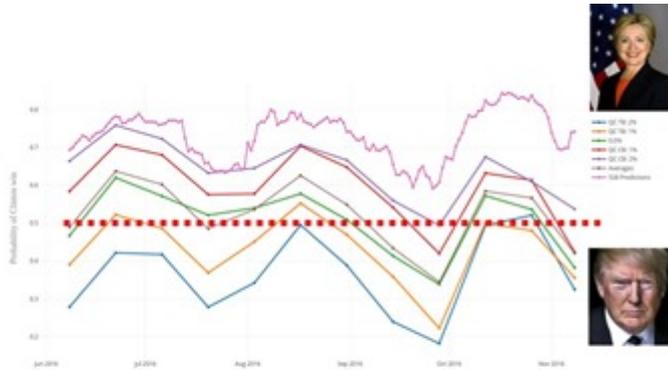
criblage de molécules
avec Biogen, l'éditeur de logiciels IQBit
et la recherche d'Accenture



modélisation d'élections
présidentielle US 2016, anticipait
un flottement dans les swing states.

- Avec **Biogen, IQbit** et **Accenture** pour du criblage de molécules visant à identifier des molécules pour un reciblage thérapeutique, avec un problème de colorisation de carte décrit dans **Programming with D-Wave Map Coloring Problem 2013** (12 pages).
- Avec **Lockheed-Martin** qui pu réduire des procédures de validation de logiciels embarqués en 6 semaines au lieu de 8 mois avec un D-Wave et son outil QVTRace, cf **Quantum Computing Approach to V&V of Complex Systems Overview, 2014** (31 slides) et **Experimental Evaluation of an Adiabatic Quantum System for Combinatorial Optimization, 2013** (11 pages).
- Avec la NASA qui a également expérimenté les D-Wave dans différents domaines, y compris pour la détection d'exoplanètes par analyse d'observations télescopiques par la méthode des transits ainsi que pour divers problèmes d'optimisation et de planification, cf la très intéressante présentation **Quantum Computing at NASA: Current Status** de Rupak Biswas, 2017 (21 slides) ainsi que **Adiabatic Quantum Computers: Testing and Selecting Applications** de Mark A. Novotny, 2016 (48 slides), dont de nombreux slides sont caviardés pour des raisons de confidentialité.
- La plus étonnante est cette **analyse de sondages a posteriori** de l'élection présidentielle par **QxBranch**. Elle anticipe un flottement dans les *swing states* qui ont décidé de l'élection de Trump via des analyses de corrélations entre états avec des matrices de corrélation difficiles à calculer en temps normal. En gros, l'algorithme amplifie les phénomènes "de battements d'ailes de papillons" à l'aide de machines de Boltzmann. Petit détail : cette prévision a été réalisée **après l'élection** en question, ce qui enlève une bonne partie de son intérêt ! **Qxbranch** est une startup australienne qui a aussi créé une **solution quantique dans la finance**. La NASA aurait aussi utilisé D-Wave pour détecter des exoplanètes.

Q^xBranch
 modélisation d'élections
 présidentielle US 2016,
 anticipait un flottement
 dans les swing states.



comparaison du modèle de prédiction du site 538
 et des prédictions quantiques de QxBranch

Pour en savoir plus sur D-Wave, voici leurs **explications sur la structure de leur matériel**, une **vidéo d'explication** de la structure des chipsets de D-Wave, une **vidéo de Linus**, un blogueur qui rentre dans les entrailles d'un D-Wave 2000Q de manière assez détaillée, **D-Wave quantum computer de Gradu Amaierako Lana**, 2016 (33 pages), la **vidéo de l'intervention de Colin Williams à USI** en juin 2018 à Paris (33 minutes) ainsi que **Near-Term Applications of Quantum Annealing**, 2016, une présentation de Lockheed Martin intéressantes sur les usages d'un ordinateur D-Wave (34 slides). Et les témoignages de leurs clients dans **Qubits 2017**.

En résumé : le recuit quantique a beau être une technique contestée par nombre de spécialistes, elle a le mérite d'exister et d'être testable dans de nombreux cas d'usages. Il serait bête de s'en priver pour commencer à explorer les possibilités du calcul quantique quitte à se rabattre ensuite sur les ordinateurs quantiques universels lorsque ceux-ci dépasseront la centaine de qubits logiques.



Fujitsu est un des leaders mondiaux du marché des supercalculateurs. Il était donc logique, comme pour le Français Atos, qu'ils explorent des moyens de continuer à faire monter en puissance leur offre.

Fin mai 2018, le Japonais annonçait avoir mis au point un ordinateur utilisant le recuit digital à température ambiante. Il scalerait bien mieux que ceux de D-Wave. Voir **Fujitsu's CMOS Digital Annealer Produces Quantum Computer Speeds**, 2018.

La technologie dénommée "Digital Annealer" est développée sur silicium en CMOS et en partenariat avec l'Université de Toronto. Elle serait déjà proposée dans le cloud. Elle sert à résoudre des problèmes d'optimisation et notamment à réaliser du criblage de molécules dans les biotechs.

Le "Digital Annealer" est un chipset dédié comportant 1 024 blocs de mise à jour de bits intégrant de la mémoire pour stocker leurs poids et avec une précision de 16 bits, des blocs logiques pour réaliser des inversion de valeurs, et les circuits de contrôle associés. Cela fait penser à des réseaux de neurones à base de memristors dans le principe. Comme pour les D-Wave, les problèmes sont chargés dans le système sous forme de matrices avec des biais dans les liaisons entre éléments et le système recherche un état d'énergie minimum pour résoudre le problème. La partie logicielle est fournie par le Canadien IQBit, dans lequel ils ont investi.



Ce système n'est cependant pas du tout quantique ! Il concurrence malgré tout directement D-Wave. Son concepteur, Hidetoshi Nishimori, du Tokyo Institute of Technology, pense que Fujitsu arrivera à créer des solutions plus performantes que celles de D-Wave. Il prévoit de produire des puces de 8192 blocs en 2019 et d'atteindre un million de blocs plus tard alors que la montée en puissance prévue de D-Wave est bien plus lente. Bref, le CMOS classique n'a pas dit son dernier mot !

Dans la **partie suivante**, nous ferons le tour des acteurs des ordinateurs quantiques supraconducteurs universels, notamment IBM, Google, Intel et Rigetti.

Cet article a été publié le 13 août 2018 et édité en PDF le 20 mars 2024.
(cc) Olivier Ezratty – “Opinions Libres” – <https://www.oezratty.net>