

## Chapitre 3

# Comprendre les tenants et aboutissants

### 1. Pourquoi cela ne fonctionne pas bien ?

#### 1.1 Décohérence quantique

Les états quantiques sont extrêmement fragiles et sensibles aux interactions. À un niveau macroscopique, l'opération de mesure qui consiste à déterminer, à un instant donné, l'état d'un système quantique, provoque la destruction de celui-ci. À un niveau microscopique, les interactions entre les différentes particules ou molécules modifient le niveau d'énergie desdites particules et provoquent ainsi des perturbations du système quantique.

Ces états quantiques peuvent être représentés par des particules ou des ondes (cf. chapitre Introduction - section Petite histoire de l'informatique quantique). Cette propriété générale des objets suffisamment petits s'appelle la dualité onde-corpuscule.

À un niveau très petit, les différentes ondes sont bien en phase et réglées les unes par rapport aux autres, elles forment un ensemble cohérent. À cause de menues perturbations, certaines de ces ondes se retrouvent en avance ou en retard, c'est-à-dire déphasées. C'est ce que nous appelons la décohérence quantique. C'est un peu comme deux musiciens bien synchronisés au départ, qui finissent par jouer sur des rythmes différents : l'air mélodieux se transforme alors en cacophonie.

Plus le système est complexe, plus il est difficile de maîtriser ces différentes interactions, et donc de maintenir un système cohérent. Pour reprendre la métaphore musicale : il est plus facile de synchroniser deux musiciens qu'un orchestre au complet.

Les ordinateurs quantiques sont soumis à des bruits différents en fonction de leur architecture. Dans beaucoup de cas cependant, la température joue un rôle dans l'apparition du bruit. Pour les particules qui constituent les ordinateurs quantiques, une température élevée est synonyme d'une certaine activité de leur part (tout comme les activités physiques augmentent la température de notre corps). Sauf dans certains cas, comme pour les photons, l'activité des particules génère des interactions non maîtrisées qui en retour induisent une certaine décohérence.

### 1.1.1 Architecture des ordinateurs quantiques

Les ordinateurs quantiques basés sur les supraconducteurs sont actuellement au cœur du développement des ordinateurs quantiques. Ils sont utilisés par des entreprises telles que :

- D-Wave Systems : constructeur canadien spécialisé dans le développement d'ordinateurs quantiques basés sur des qubits supraconducteurs pour résoudre des problèmes d'optimisation. Ces ordinateurs sont accessibles par l'intermédiaire d'un service cloud appelé Leap.
- Rigetti Computing : constructeur californien (États-Unis) d'ordinateurs quantiques basés sur les qubits supraconducteurs. Ces ordinateurs sont mis à disposition par l'intermédiaire d'un service cloud appelé QCS (*Quantum Cloud Services*).
- IBM : recherche et développement dans le domaine de l'informatique quantique, y compris la fabrication de qubits et la mise à disposition de plateformes pour la recherche et le développement quantiques. La figure 28 illustre la structure générale d'un ordinateur quantique d'IBM.

- Google : développement de qubits supraconducteurs et de technologies de calcul quantique. L'entreprise américaine tend désormais à se spécialiser dans les algorithmes d'intelligence artificielle quantique via Quantum AI. Quantum AI est également une plateforme cloud qui permet d'accéder aux ordinateurs et simulateurs quantiques de Google.
- CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) : un acteur majeur de la recherche quantique en France. Les travaux du CEA sur les qubits supraconducteurs ont notamment permis la conception de qubits plus cohérents.
- Oxford Quantum Circuits : un constructeur de qubits supraconducteurs basé à Oxford au Royaume-Uni et issu des travaux de recherche de l'université d'Oxford. En particulier, l'entreprise se focalise sur l'augmentation du nombre de qubits via une méthode brevetée (Coaxmon) qui permet d'augmenter l'espace disponible sur les circuits quantiques. L'entreprise propose, elle aussi, un service cloud pour accéder aux ordinateurs quantiques.
- QuTech : issue des travaux de recherche de l'université technologique de Delft (TU Delft) aux Pays-Bas, cette startup s'est fait connaître récemment par la publication d'une architecture originale, qui combine deux approches [18], à savoir les qubits supraconducteurs et les qubits de spin (cf. sous-section Qubits de spin dans ce chapitre).
- AWS : l'entreprise américaine Amazon possède des partenariats avec plusieurs entreprises qui utilisent des ordinateurs quantiques basés sur les supraconducteurs, notamment Rigetti Computing et Oxford Quantum Circuits. Ces ordinateurs quantiques sont accessibles par l'intermédiaire de Braket, qui est à la fois une plateforme et une librairie de programmation pour les ordinateurs quantiques d'Amazon.

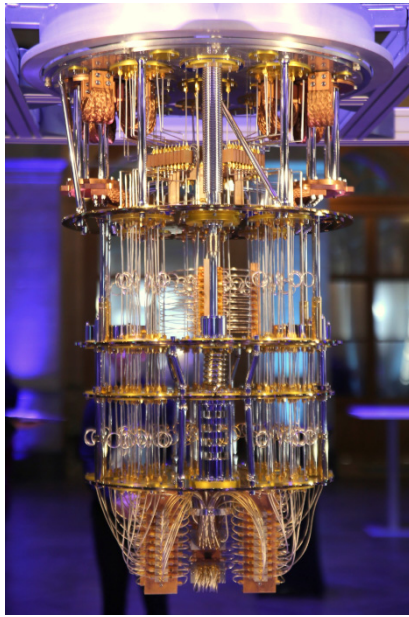


Figure 28

Ordinateur quantique d'IBM (2018), basé sur les qubits supraconducteurs. Cette pyramide inversée est en fait un réfrigérateur géant. Le haut (c'est-à-dire la base de la pyramide) contient le matériel électronique qui fonctionne à température ambiante et sur lequel s'exécutent les composants applicatifs. Le milieu de la pyramide contient une puce de contrôle (CMOS – *Complementary Metal-Oxide Semiconductor*). C'est un composant matériel qui fait l'interface entre les éléments de l'informatique classique (en haut) et le processeur quantique qui se trouve tout en bas (c'est-à-dire au sommet de la pyramide inversée). Ce processeur se situe à l'endroit le plus froid (environ -273 degrés Celsius) de la pyramide. Ces conditions de froid extrêmes sont moins susceptibles d'induire de la décohérence quantique. L'état des qubits à ces températures est donc plus stable.

### ■ Remarque

*Il n'y a pas de câble électronique permettant de programmer directement le processeur quantique. Les instructions viennent d'un terminal classique et sont converties en micro-ondes avant d'être envoyées au processeur quantique. Les mesures des états quantiques sont, elles, amplifiées, puis converties sous la forme d'un signal qui peut être digitalisé.*

Source : <https://www.flickr.com/photos/feuillu/46028735084>, image partagée gracieusement par son auteur, Pierre Métivier, pour cet usage exclusivement

Différents types de qubits supraconducteurs existent :

- les qubits de flux ;
- les qubits de charge ;
- les qubits de phase.

### Les qubits de flux

Les qubits de flux sont utilisés dans les ordinateurs quantiques supraconducteurs. Dans sa forme la plus simple, un qubit de flux est constitué d'une boucle supraconductrice (c'est-à-dire un circuit fermé réalisé à partir d'un matériau supraconducteur) qui intègre une jonction de Josephson (c'est-à-dire une fine couche d'isolant séparant deux matériaux supraconducteurs).

L'ajout de cette jonction de Josephson induit un courant supraconducteur, ce qui signifie que ce courant circule à l'intérieur du circuit sans rencontrer la moindre résistance, comme si la jonction n'existait pas. Ce phénomène est connu sous le nom d'effet Josephson. Fait remarquable : ce courant existe même en l'absence de tension. Il peut être continu ou alternatif.

Dans le contexte d'un courant alternatif, il existe donc deux flux de courant : un dans le sens horaire, l'autre dans le sens antihoraire. Ces deux flux sont superposés à l'intérieur de la boucle supraconductrice (figure 29).

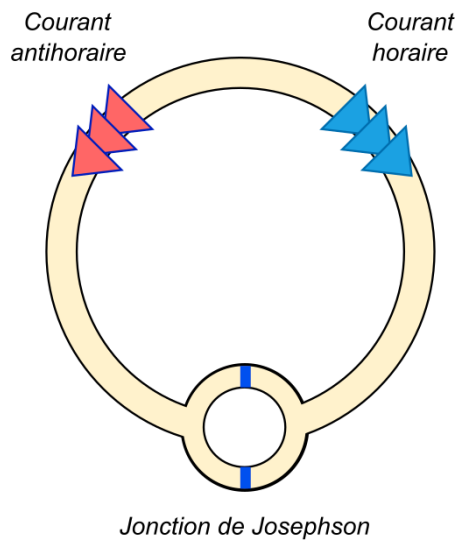


Figure 29

Représentation schématique d'un qubit de flux composé d'une boucle réalisée à partir d'un matériau supraconducteur et d'une jonction de Josephson (représentée par la petite boucle en bas du schéma). L'effet Josephson induit deux courants circulant dans des sens différents à l'intérieur de la boucle.

Figure adaptée de [19]

Cela signifie que l'état quantique des qubits de flux est en quelque sorte encodé par la probabilité du courant de circuler dans un sens ou dans l'autre. Pour mesurer l'état d'un qubit, nous mesurons alors le sens de circulation le plus proche du sens horaire (ce qui correspond à l'état  $|0\rangle$ ) ou antihoraire (l'état  $|1\rangle$ ) à un moment donné.

Les entreprises D-Wave Systems et Rigetti Computing sont connues pour leurs travaux sur les qubits de flux. L'université technique de Delft aux Pays-Bas est également un pôle reconnu de recherche sur les qubits de flux.

Les qubits de charge

Dans les matériaux supraconducteurs, les qubits peuvent être encodés par l'intermédiaire de paires d'électrons, appelées paires de Cooper. Ces paires constituent la charge électrique fondamentale à l'intérieur des matériaux supraconducteurs.

Une boîte de paires de Cooper, appelée encore îlot, est créée en reliant une jonction de Josephson à un condensateur (figure 30).

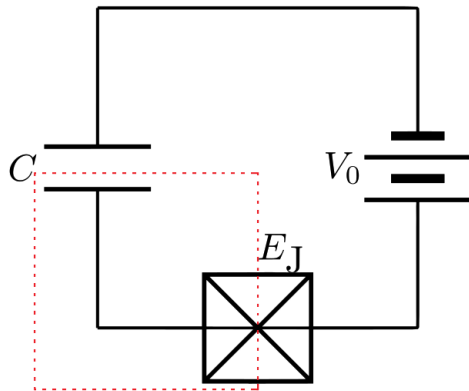


Figure 30

Un îlot ou boîte de paires de Cooper (en pointillés) est obtenu en reliant une jonction de Josephson ( $E_J$ ) à un condensateur ( $C$ ). Tout ce qui est en dehors de l'îlot est appelé réservoir.  $V_0$  est le voltage, ou la tension appliquée au circuit.

Source : [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Charge\\_qubit\\_circuit.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Charge_qubit_circuit.svg) ; <https://medium.com/qiskit/how-the-first-superconducting-qubit-changed-quantum-computing-forever-96cf261b8498>

Lorsqu'une tension est appliquée au circuit ( $V_0$  sur le schéma), les paires de Cooper passent par la jonction de Josephson pour rejoindre l'îlot. En effet, la jonction de Josephson entre le réservoir et l'îlot reste perméable et peut permettre le passage de paires de Cooper vers et en dehors de l'îlot, ce qui fait varier la charge à l'intérieur de l'îlot. Le niveau de charge de l'îlot dépend donc du nombre de paires de Cooper qui sont passées par cette jonction.