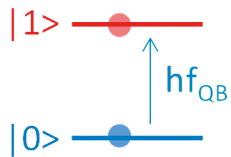


Un processeur quantique élémentaire

PRINCIPE

Prototype de processeur quantique élémentaire basé sur des composants « Josephson », ce circuit, entièrement supraconducteur et fonctionnant à 20 mK, est fabriqué par des techniques standard de microélectronique.

Qu'est-ce qu'un bit quantique (qubit) ?



Dans un ordinateur classique, l'information est stockée dans un ensemble (registre) de cases mémoires, les bits, dont la valeur est soit 0, soit 1. Un bit quantique (qubit) a, quant à lui, deux états quantiques $|0\rangle$ et $|1\rangle$, séparés par une différence d'énergie définissant sa fréquence (f_{QB}), et peut être à la fois dans ces deux états. Au cours d'un algorithme (succession d'opérations dites « portes logiques »), le registre de qubits se trouve dans une superposition quantique de tous ses états possibles ($|00\dots0\rangle$, $|10\dots0\rangle$, $|11\dots1\rangle$, $|10\dots1\rangle$), permettant un calcul massivement parallèle.

Fonctionnement

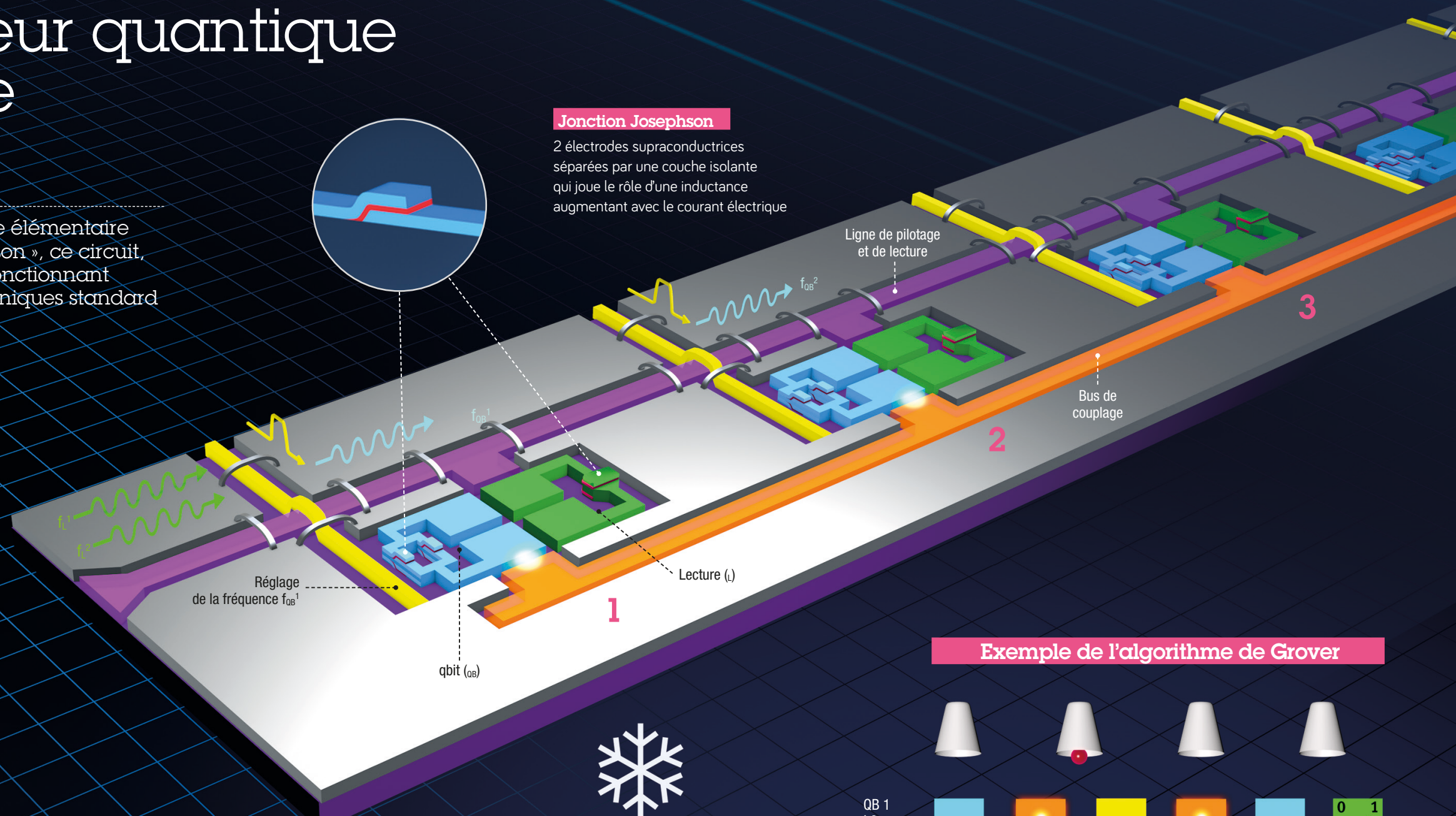
Des cellules identiques (1, 2, 3...) sont placées le long d'une ligne électrique de pilotage et de lecture des bits quantiques (qubits). Chaque cellule comprend un qubit et son propre circuit de lecture, ainsi qu'une ligne électrique pour changer la fréquence f_{QB} du qubit. Tous les qubits sont couplés à un résonateur micro-onde de fréquence f_{QB} servant de bus de couplage.

- Pour implémenter une porte logique à 1 qubit, une impulsion micro-onde à la fréquence d'un qubit particulier lui est envoyée : elle modifie ainsi son état de superposition de $|0\rangle$ et de $|1\rangle$.

- Pour une porte à 2 qubits, la fréquence des deux qubits choisis (ici **A** et **B**) est amenée temporairement près de celle du bus de couplage : deux impulsions sur les lignes de réglage font que les 2 qubits échangent un photon à travers le bus.
- Finalement, les circuits de lecture sont activés simultanément par des impulsions micro-ondes (à leur fréquence f_i) plus ou moins retardées déphasées selon le résultat 0 ou 1 lu.

Jonction Josephson

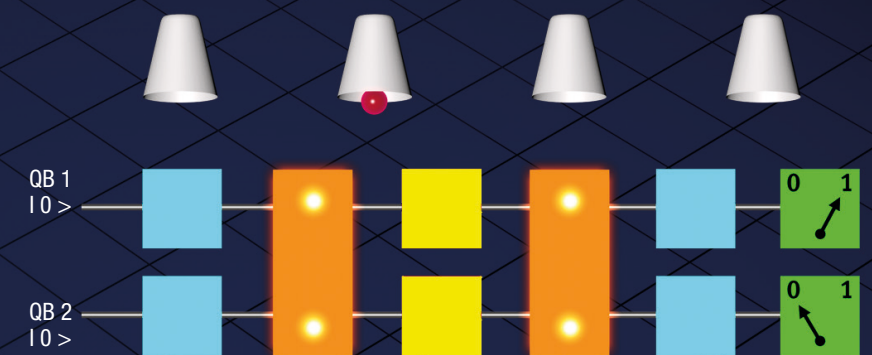
2 électrodes supraconductrices séparées par une couche isolante qui joue le rôle d'une inductance augmentant avec le courant électrique



Exemple de l'algorithme de Grover



La température de fonctionnement du circuit est de 20 mK (millikelvin), soit - 273,13° Celsius.



Comment trouver la boule cachée sous l'un des quatre gobelets en n'utilisant qu'une fois la fonction « soulever-un-gobelet » ? Impossible classiquement car, soulever un gobelet au hasard ne découvre la boule qu'une fois sur quatre. Mais, c'est possible avec l'algorithme quantique de Grover

qui soulève les quatre gobelets en un seul appel à la fonction « soulever-un-gobelet ». Cet algorithme est une succession de portes logiques à 1 et 2 qubits suivie d'une lecture finale (10 impulsions en tout).

TOUT
S'EXPLIQUE



La quantronique du CEA à plus d'un tour dans son sac

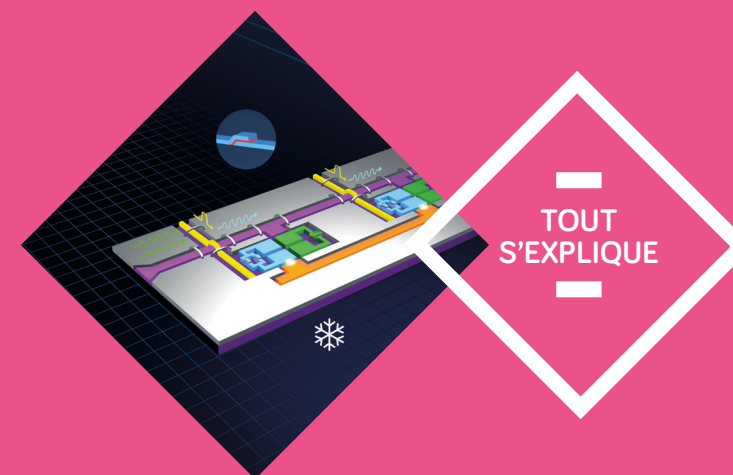
Imaginons des circuits tels de véritables atomes artificiels, dans lesquels les variables électriques (comme le courant) sont aussi quantiques que la vitesse d'un électron dans un atome. Une vision à portée de main du Groupe Quantronique de l'institut Iramis de la Direction de la recherche fondamentale du CEA qui, en 1997, a notamment réalisé un circuit supraconducteur à une jonction Josephson : la boîte à paires de Cooper. De quoi inspirer d'autres leaders mondiaux en la matière, comme la société NEC ou l'Université de Yale. Cette dernière, en 2004, a livré la version « transmon » de ce circuit, aujourd'hui utilisé par tous les acteurs du domaine, dont Google, pour réaliser des processeurs quantiques élémentaires.

Les recherches du groupe du CEA sont plus larges : qu'il s'agisse de tester des prédictions importantes en physique mésoscopique (échelle de grandeur à laquelle la mécanique quantique régit le transport électronique),

grâce à des contacts métalliques de taille atomique ; ou d'obtenir une preuve de concept pour une mémoire quantique à base d'électrons piégés dans le diamant, ouvrant la voie à des processeurs quantiques hybrides combinant circuits et entités microscopiques...

Les « quantroniciens » ont également amélioré par quatre ordres de grandeur la sensibilité de la Résonance paramagnétique électronique, une étape intermédiaire vers le contrôle quantique d'un spin électronique unique ! Des recherches parallèles sont également menées. Ce qui a notamment permis aux chercheurs de l'Iramis d'injecter dans un circuit des électrons uniques sans exciter les autres électrons présents. De même, des physiciens d'un autre institut de la Direction de la recherche fondamentale, l'Inac, ont exploité des transistors CMOS de très petite taille réalisés avec le Leti, institut de CEA Tech, pour faire passer un courant par un seul état quantique électronique...

les défis 214
du cea



Processeur quantique élémentaire

Réalisé par le CEA, ce prototype de processeur quantique élémentaire permet de réaliser des portes logiques à 1 et 2 bits quantiques (qubits).

Il repose sur des électrodes supraconductrices et peut être fabriqué par des techniques standards de microélectronique. Un premier pas vers l'ordinateur quantique...

ENJEU



En expliquant durant le XX^e siècle l'essentiel des propriétés de la matière sous toutes ses formes, la mécanique quantique a effectué une révolution de notre compréhension du monde physique. Elle a conduit à des technologies modernes comme l'électronique, le laser, etc. Pourtant, ces outils sont « classiques », ne faisant pas appel, dans leur principe de fonctionnement, aux concepts fondamentaux de la physique quantique. Par exemple, celui de « superposition quantique des états » qui permet à un système d'être simultanément dans plusieurs états à la fois...

La démonstration dans les années 1980 que des machines exploitant cette propriété pourraient être bien plus efficaces que leurs versions classiques, a amorcé une seconde révolution quantique en ingénierie, notamment pour le traitement de l'information. L'ordinateur quantique serait ainsi capable de résoudre

certains problèmes pratiques difficiles hors de portée des ordinateurs conventionnels : factorisation des grands nombres, recherche dans une base de données non organisée, détermination de structures moléculaires complexes... Mais, sa réalisation fait face à une difficulté majeure : la « décohérence » selon laquelle l'interaction inévitable d'un système physique avec son environnement détruit très rapidement toute superposition d'états quantiques qui se trouve alors transformée en un simple état classique.

En réalisant des circuits supraconducteurs sans dissipation et très bien isolés de leur environnement électrique à très basse température, la communauté scientifique internationale (dont les physiciens de l'institut Iramis du CEA) a réussi à faire entrer des circuits électriques encore très simples dans le régime quantique, et même à réaliser des processeurs quantiques, certes très élémentaires.