



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

Séance solennelle de l'Académie des sciences / 17 juin 2008
Réception sous la coupole de l'Institut de France des Membres élus en 2007

Circuits intégrés et bits quantiques
Michel Devoret

Énoncés il y a plus de quatre-vingts ans, les principes de la Mécanique Quantique continuent à fasciner les physiciens comme le grand public, tant ils semblent contraires à l'intuition du monde physique que développe chacun d'entre nous. Pourtant, si on les envisage du point de vue de l'information traitable par une machine miniaturisée à l'extrême, où chaque bit d'information doit être exprimé avec la plus petite énergie possible, ces principes quantiques apparaissent bien plus naturels et bien plus économes que ceux de la mécanique classique. Ce nouvel et surprenant éclairage apporté par la science de l'information à la physique quantique va en fait beaucoup plus loin qu'un simple commentaire esthétique. En effet, les physiciens, en association avec les informaticiens et les mathématiciens, ont compris au cours des quinze dernières années, que les "bits quantiques" sont en réalité plus puissants collectivement que les traditionnels "bits classiques" sur lesquels sont basés les ordinateurs actuels. Ces "bits quantiques" permettent par exemple une accélération exponentielle de certains calculs, comme la factorisation des nombres, nécessaire au décryptage des informations confidentielles échangées sur le réseau Internet. En même temps, ils permettent de coder l'information de manière à ce qu'aucune copie ne soit possible. L'ordinateur quantique est la machine – encore hypothétique – qui serait capable de traiter ces bits quantiques, mais elle n'existe à ce jour qu'en pièces détachées. Même si de nombreux laboratoires cherchent à les améliorer et à les combiner, de nombreuses questions de fond restent encore à résoudre.

Parmi les travaux qui m'ont valu l'honneur d'être reçu aujourd'hui dans cette prestigieuse assemblée, ceux qui me tiennent le plus à cœur sont justement ceux qui ont contribué à l'invention, à la réalisation et à l'utilisation d'un nouveau type de circuit intégré, avec lequel il est possible de réaliser des bits quantiques que l'on peut câbler ensemble électriquement. Les circuits intégrés traditionnels sont basés sur les semi-conducteurs, c'est-à-dire sur des matériaux dans lesquels le courant électrique est transporté à la fois par des électrons et par des sortes d'antiélectrons appelés "trous" - le silicium est

l'exemple le plus répandu de ce type de matériaux. Nos nouveaux circuits intégrés sont eux basés sur un autre type de matériaux, les supraconducteurs, qui transportent le courant par le mouvement corrélé de paires d'électrons, comme par exemple l'aluminium à très basse température. Le grand avantage des supraconducteurs est que le courant électrique y circule sans aucune perte.

Il y a cependant une grande différence entre la situation où un courant circule dans un circuit sans dissipation et celle où on amène le courant à circuler dans les deux sens à la fois, ainsi que le réclame la superposition d'état cohérente que doit pouvoir exhiber le bit quantique. C'est à une démonstration de cette superposition d'état faisant intervenir un nombre macroscopique d'atomes du circuit, que mes collègues et moi sommes parvenus pendant l'automne 2001, après une quinzaine années de recherche au laboratoire de l'Orme des Merisiers à Saclay, fondé par Anatole Abragam. Notre bit quantique est un atome artificiel qui a l'avantage de pouvoir traiter quantiquement l'information qui se propage sur un simple fil électrique de raccordement, comme dans les circuits intégrés ordinaires.

Pourquoi tant d'années pour arriver à ce résultat ? En fait l'information quantique est très fragile. Elle se corrompt rapidement si elle se couple à des degrés de liberté mal contrôlés. C'est l'effet qu'on appelle décohérence. Or, il est impossible d'isoler complètement le bit quantique pour le rendre parfaitement cohérent. On veut pouvoir lire son information, ou bien encore la communiquer à un autre bit quantique une fois qu'on l'a traitée. Dans un circuit intégré ordinaire, il est possible de stabiliser l'information portée par le courant, en utilisant des résistances, au prix d'ailleurs d'une consommation d'énergie qui devient de plus en plus préoccupante au fur et à mesure que l'on miniaturise le circuit. Mais dans un circuit intégré quantique, cette solution n'est pas possible, car la dissipation n'est rien d'autre qu'un très faible couplage à un très grand nombre de degrés de libertés non-contrôlés. Il faut donc être capable de réaliser un très bon interrupteur, capable à la fois d'isoler le bit quantique pendant sa fonction mémoire, et de le coupler efficacement au dispositif de lecture et aux bits quantiques quand son état doit être révélé.

De nombreuses étapes ont été nécessaires pour arriver à ce résultat. Je ne peux pas vous raconter pendant les dernières minutes qui me restent toutes les péripéties de ces recherches enthousiasmantes auxquelles ont participé plusieurs groupes sur trois continents. Je me limiterai à la résolution amusante du problème de l'empoisonnement du circuit par des électrons non-appariés. Ceux-ci, en célibataires frustrés en quelque sorte, participent activement à l'action parasite des degrés de liberté incontrôlés. Nous les avons neutralisés en incluant en marge du circuit des électrodes d'or, métal non-supraconducteur. Dans cette sorte de traitement homéopathique combattant le mal par le mal, on offre aux électrons célibataires la possibilité de migrer vers une zone où leur énergie est plus faible, les détournant ainsi des parties critiques du bit quantique où ils pourraient nuire à sa cohérence.

Est-ce qu'il sera possible un jour de faire fonctionner l'ordinateur quantique avec des circuits intégrés supraconducteurs? Nous n'avons, pour l'instant, qu'une preuve de principe qu'une telle machine puisse être jamais construite, et sa réalisation effective

demeure un défi pour la science et la technologie. Il serait même possible que les principes quantiques trouvent leur limite dans ce type de machine, même si cela reste peu probable, tant ces principes semblent, au vu des expériences actuelles, indéracinables. Inversement, c'est en construisant une machine basée sur les lois de la physique quantique que l'on comprend vraiment celles-ci, comme l'ont montré les réalisations passées dans le domaine du laser et du transistor. Et aussi incertaines que soient actuellement les réponses quant à la faisabilité de l'ordinateur quantique en général, je suis convaincu que cette nouvelle quête du Graal finira par produire de grandes avancées à la fois dans les sciences et dans les technologies de l'information.

Permettez-moi, avant de terminer ce bref exposé de mes travaux, de remercier tous mes proches collègues et amis de l'Orme des Merisiers, et en particulier Daniel Esteve et Cristian Urbina, sans lesquels rien n'aurait été possible et tout aurait été beaucoup moins passionnant.