

> deux des autres filières, par exemple, les électrons sont liés soit au sein de petites boucles de courant en milieu supraconducteur, soit au sein de «boîtes quantiques» réalisées dans du silicium – de minuscules structures où l'électron est confiné.

Tandis que Google et IBM mènent la danse dans la première filière, des équipes des Pays-Bas, d'Australie et des États-Unis la mènent dans la deuxième. Des chercheurs du CEA et du CNRS à Grenoble s'y sont aussi lancés en 2016. Bref, dans ces filières, on a reconstitué au sein d'atomes artificiels l'équivalent d'une échelle des états d'énergie d'électrons atomiques. La très grande subtilité technique de la construction et du maintien en cohérence des superpositions d'états en milieu solide a limité jusqu'à présent le nombre de qubits atteint: il est d'environ 20 dans le cas des dispositifs supraconducteurs, et de 2 dans le cas des boîtes quantiques en silicium...

Seulement 2 ? Pourquoi alors poursuivre dans cette voie ?

Pascale Senellart-Mardon : Ce nombre modeste de qubits du côté du silicium reflète le grand défi à relever pour que cette technologie soit viable: trouver le moyen d'augmenter le nombre de qubits intriqués. Pour autant, comme cette filière s'appuie sur la technologie CMOS qui sert à produire les microprocesseurs actuels, son potentiel industriel est grand et il est donc important de l'explorer. Si l'on parvenait à intriquer un grand nombre de qubits réalisés en semi-conducteurs, on aurait toute facilité pour les produire par millions...

Mais les intriquer en grand nombre ne suffit pas ; ne faut-il pas aussi réussir à conserver la cohérence des états correspondants ?

Pascale Senellart-Mardon : Oui, il y a aussi un défi du côté de la cohérence, comme dans tout système à l'état solide, mais le défi est aussi du côté de la «connectivité», c'est-à-dire la capacité à intriquer des qubits qui sont distants les uns des autres. Pour l'instant, l'état de l'art avec le silicium consiste à intriquer une boîte quantique avec sa plus proche voisine seulement !

Existe-t-il une autre filière où l'on peut espérer intriquer un grand nombre de qubits sans perdre trop rapidement leur cohérence ?

Pascale Senellart-Mardon : La mienne, peut-être, celle de l'ordinateur quantique optique. Dans cette voie, les qubits sont par exemple les états de polarisation de photons uniques, photons que l'on combine en

les introduisant simultanément à l'entrée d'un circuit optique effectuant le calcul. Les portes logiques quantiques peuvent être réalisées à base de miroirs, de lames semi-transparentes, c'est-à-dire de séparateurs de faisceau et autres déphaseurs, le tout relié à des détecteurs via un réseau de fibres optiques. Or les états photoniques peuvent voyager très loin sans perdre leur cohérence; donc, si l'on parvient à éviter les pertes, on peut réaliser un grand nombre de portes logiques. Et, ce qui ne gâche rien, les ordinateurs quantiques optiques sont évidemment compatibles avec les réseaux de communication optique.

Tout semble donc aller pour le mieux dans ce monde photonique ?

Pascale Senellart-Mardon : Sauf qu'il y a une difficulté de taille... Lorsqu'on effectue un calcul, il existe une probabilité élevée de n'aboutir à aucun résultat. Cela tient au principe des portes logiques qui utilisent des séparateurs de faisceau. Comme, à chaque séparateur, les photons intriqués ont 50% de chance de ne pas être transmis par la voie qui, après beaucoup d'autres embranchements, mènera au détecteur, il se peut qu'aucun signal ne sorte. Pour reprendre l'image de tout à l'heure, tout se passe comme si l'étage de calcul était un labyrinthe dont la traversée résout un

d'autres moyens de faire des calculs à grande échelle: on ne partira plus d'états à un photon, mais, pour limiter le nombre de portes logiques, d'états intriqués à plusieurs photons. Cette autre façon de calculer repose sur une autre architecture de calcul quantique, dite «fondée sur la mesure».

Finalement, cette filière de l'ordinateur quantique et optique est-elle prometteuse ?

Pascale Senellart-Mardon : Elle a semblé au point mort pendant longtemps, parce que pour produire les états superposés de départ, il faut des sources de photons à la fois uniques – arrivant seuls – et absolument identiques – de même fréquence. Or les sources dont nous disposons dans le passé étaient si peu efficaces qu'il fallait pratiquement deux ou trois ans, le temps d'une thèse de doctorat, avant de parvenir à exécuter un petit calcul.

Pourquoi la situation a-t-elle changé ?

Pascale Senellart-Mardon : Parce que mon équipe au Centre de nanosciences et de nanotechnologies a réussi à mettre au point un petit composant presse-bouton, qui peut émettre à volonté des photons un par un. Pour aller vite, nous avons mis une boîte quantique – un atome artificiel donc, où un électron ne peut occuper que certains

Des spécialistes des algorithmes commencent à envisager la programmation d'ordinateurs quantiques

problème difficile, mais qu'à chaque embranchement, le candidat perd la moitié de sa substance – de son intensité lumineuse utile – quand il se dédouble en un état superposé de son *alter ego* et de lui-même... Autrement dit, au bout d'un moment, on va perdre trop de lumière pour parvenir à faire le calcul.

C'est un obstacle sérieux...

Pascale Senellart-Mardon : Oui, mais nous avons des solutions pour affronter cette difficulté. Des théoriciens ont trouvé

niveaux d'énergie – à l'intérieur d'une cavité optique. Comme pour tous les atomes, si on excite cet atome artificiel, il va en se désexcitant émettre un seul photon, mais dans une direction quelconque. Ici, la cavité et les miroirs qui la constituent ont été choisis de telle façon qu'ils augmentent la probabilité que la lumière se concentre dans une direction donnée. En d'autres termes, grâce à la cavité, on contrôle l'«émission spontanée» de l'atome.

Sans cavité optique, tout se passe comme si l'énergie lumineuse émise par