



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 ?

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 problème difficile, mais qu'à chaque embranchement, le candidat perd la moitié de sa substance – de son intensité lumineuse utile – quand

La société IBM construit les premiers ordinateurs quantiques à base de circuits supraconducteurs, le dernier en date étant le Q System One (*ci-dessus*), qui a 20 qubits. IBM propose par ailleurs une plateforme en ligne où ses utilisateurs peuvent y faire fonctionner des processeurs quantiques de quelques qubits. L'objectif de cette initiative est d'accumuler de l'expérience dans l'exécution d'algorithmes afin d'explorer les possibilités de l'informatique quantique.

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.

La probabilité d'avoir un signal en sortie diminue donc avec le nombre de portes logiques. C'est un obstacle sérieux...

Oui, mais nous avons des solutions pour affronter cette difficulté. Des théoriciens ont trouvé 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 ?

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 disposions 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. ➤

► Et pourquoi la situation a-t-elle changé ?

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 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 l'atome artificiel sortait d'une grande baignoire par une infinité de petits trous. Avec la cavité optique, on ajoute en pratique un énorme trou dans la baignoire... et naturellement la majorité de l'énergie lumineuse va maintenant s'écouler par ce trou. Il nous suffit alors de la collecter, avec une fibre optique. Notre «baignoire», les miroirs qui la constituent et la boîte quantique qu'elle contient forment une petite structure monolithique en semi-conducteur de 20 micromètres de diamètre (voir la photo ci-contre).

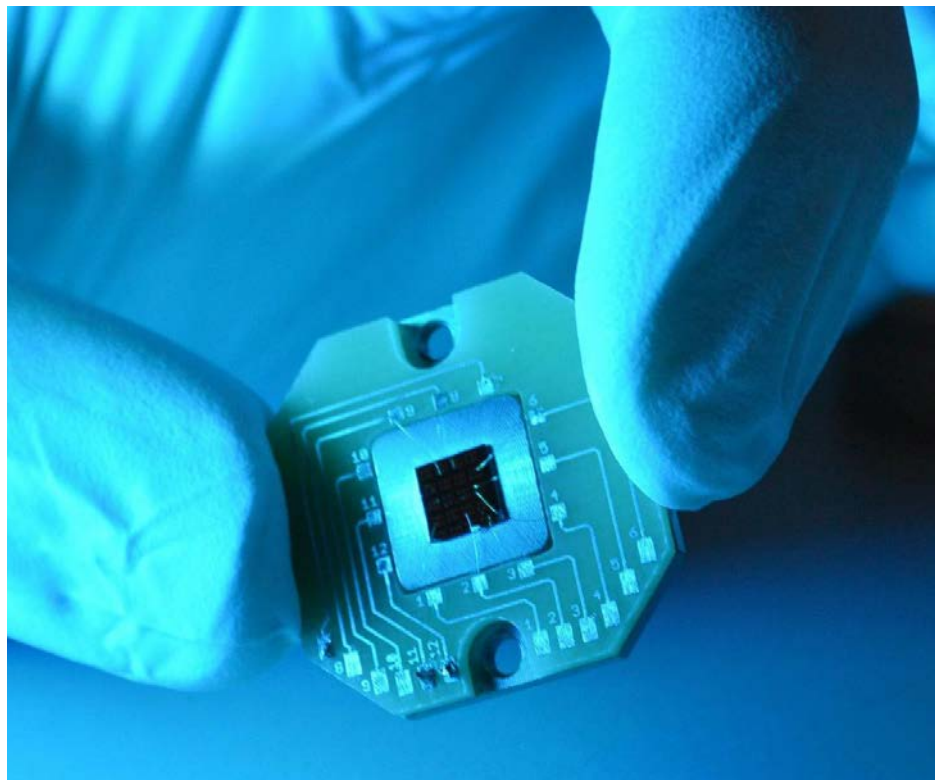
Ce qui a relancé la voie optique ?

Oui. En 2016, nous avons publié dans la revue *Nature Photonics* un article qui a eu un grand impact, puisqu'en deux ans, il a été cité plus de 400 fois. Depuis, nous sommes assaillis de demandes de chercheurs qui veulent utiliser nos sources de photons uniques pour faire du calcul quantique...

Comment réagissez-vous à cette situation ?

Comme nous ne pouvions pas faire face à toutes les demandes, avec Valérian Giesz et Niccolo Somaschi, nous avons créé la société Quandela. Mon rôle au CNRS consiste à faire de la recherche, et non à fabriquer des sources pour tous les chercheurs du monde qui en ont besoin. Maintenant, grâce à Quandela, nous pouvons leur fournir des sources qui, par rapport aux anciennes, réduisent le temps de calcul d'un milliard pour neuf qubits, c'est-à-dire ici neuf photons... Nous en avons déjà vendu en Australie, mais nous avons aussi des collaborations avec des chercheurs qui viennent dans notre laboratoire avec leur puce optique pour effectuer des calculs.

Si je comprends bien, l'aspect matériel de l'ordinateur quantique en est encore à ses débuts, bien que l'on progresse. Et pour l'aspect logiciel ? Existe-t-il déjà



des algorithmes ou des programmes pour ordinateurs quantiques ?

Les recherches dans ce domaine ont très longtemps été une activité de physiciens d'un côté, et de théoriciens faisant de l'algorithmique quantique de l'autre. Actuellement, quelque chose de nouveau apparaît : des informaticiens spécialistes des algorithmes commencent à envisager la programmation d'ordinateurs quantiques. Corrélativement, de grandes entreprises essaient de les encourager : cette année, au CES de Las Vegas, le plus grand salon d'électronique grand public du monde, IBM a ainsi présenté Q System One, un système à 20 qubits mis sur le réseau (voir la photo page précédente). Contre un abonnement onéreux, les gens qui s'intéressent au développement de logiciels quantiques peuvent s'en servir pour tester des algorithmes... La société Atos, en France, a une autre approche : en préparation de l'avènement du calcul quantique, elle a dédié un gros ordinateur classique à la simulation d'un ordinateur quantique, ce qui permet aussi de s'habituer aux calculs quantiques, de repérer les erreurs les plus dommageables, d'étudier la façon dont les utilisateurs s'y prennent...

L'Union européenne a lancé fin 2018 un « Quantum Flagship », un programme phare sur l'ordinateur et le calcul quantique. Un tournant pour la recherche européenne ?

Ce programme va financer à hauteur d'un milliard d'euros sur dix ans des projets pour

Ce dispositif commercialisé par la société Quandela émet à intervalles de temps réguliers quelque dix millions de photons infrarouges par seconde, tous identiques. En utilisant ces sources, on peut générer des jeux de photons, chacun d'eux constituant un qubit, puis les introduire au sein de circuits optiques afin d'effectuer un calcul quantique.