

paires de photons intriqués (tels que leurs polarisations sont toujours orthogonales). Cette source peut être placée n'importe où sur le trajet : à mi-distance, chez Alice, etc. Quand Alice mesure la polarisation du photon qu'elle reçoit, elle connaît la polarisation du photon qui arrive chez Bob. Ils peuvent alors créer une clé de chiffrement comme avant : Bob fait ses mesures avec deux polariseurs et Alice lui dit quels photons conserver pour constituer la clé.

Mais comment faire si Alice et Bob se trouvent à plusieurs centaines de kilomètres l'un de l'autre ?

À elle seule, la source de photons intriqués ne résout pas le problème de la perte de signal dans la fibre. La solution est la téléportation quantique, un protocole de communication qui s'appuie sur l'intrication quantique.

Supposons qu'Alice et Bob soient en mesure d'envoyer des photons à un intermédiaire, Charlie, qui sera le « répéteur quantique ». Alice et Bob sont chacun équipés d'une source de paires de photons intriqués, respectivement (A1, A2) et (B1, B2). Les photons A1 et B1 sont envoyés à Charlie, qui réalise une mesure simultanée particulière (dite « mesure de Bell ») sur ces deux photons, lesquels se retrouvent alors intriqués. Mais les lois de la physique quantique impliquent que les deux autres photons A2 et B2, restés chez Alice et Bob, forment à leur tour une paire intriquée. Résultat : Alice et Bob partagent une paire de photons dont ils pourront mesurer les polarisations afin d'établir une clé de chiffrement.

La force du système est que le principe peut se généraliser, en plaçant autant de répéteurs que nécessaire pour couvrir la distance qui sépare Alice et Bob. Il faut aussi souligner que les répéteurs quantiques ne sont pas des nœuds de confiance, car ils n'ont pas accès à l'information partagée entre Alice et Bob. Un espion ne peut pas intercepter la clé en infiltrant un répéteur.

En 1997, les équipes de Francesco de Martini, à l'université de Rome, et d'Anton Zeilinger, à l'université d'Innsbruck, ont réalisé les premières expériences de téléportation quantique en laboratoire. En 2007, mon équipe a mis en œuvre ce phénomène sur une grande distance : nous avons injecté les photons dans le réseau de fibres optiques de Swisscom et la mesure de Bell a été réalisée bien après l'émission des photons qui se trouvaient ainsi à plusieurs centaines de mètres quand la téléportation a opéré.

La technique des répéteurs quantiques est-elle donc accessible ?

Dans les expériences de laboratoire, les photons que Charlie reçoit sont synchronisés pour arriver en même temps afin de réaliser la mesure de Bell. Or, dans des conditions réelles, ce n'est

pas le cas. Il faut donc pouvoir stocker le premier photon arrivé en attendant le second. Et cela est extraordinairement difficile. Comment le faire sans détruire le qubit ? À l'université de Genève, notre groupe a commencé à développer en 2008 des mémoires quantiques reposant sur des cristaux dopés avec des terres rares. Le cristal est refroidi à quelques kelvins pour que tous les atomes soient dans l'état fondamental. La différence d'énergie avec le premier état excité correspond à l'énergie du photon incident, qui peut alors être absorbé. Mais comme la probabilité d'absorption par le premier atome rencontré n'est pas de 100%, il peut être absorbé par le deuxième atome, le troisième, etc. Le système est en fait dans une superposition d'états du premier atome excité, du deuxième, du troisième, etc. Les atomes sont par ailleurs préparés pour définir une sorte d'horloge qui indique quand le système se désexcite et libère un nouveau photon. Ce dernier doit avoir toutes les propriétés quantiques (de superposition et d'intrication) du photon incident et doit être réémis dans la bonne direction, sinon il est perdu. Plusieurs équipes de recherche ont ainsi des prototypes de mémoires quantiques qui fonctionnent. Le défi est cependant de combiner une efficacité élevée (on parvient à restituer environ 10% des photons incidents) et des temps de stockage qui peuvent être assez longs, de l'ordre du dixième de seconde.

Les mémoires quantiques de mon laboratoire utilisent des cristaux qui font à peine un centimètre de longueur. Mais elles restent de vraies « usines à gaz », car il faut les refroidir avec un système de cryogénie. Si nous sommes encore loin d'une possible commercialisation de ces dispositifs, les progrès de ces dernières années sont encourageants.

Pour implémenter l'internet quantique sur de grandes distances en passant par les fibres optiques, la solution est d'utiliser la téléportation d'intrication quantique. Pour réaliser ce protocole, Alice et Bob ont chacun une paire de photons intriqués, (A1, A2) et (B1, B2). Les photons A1 et B1 sont envoyés à un répéteur, où une mesure dite de Bell intrique les deux photons. D'après les règles de la mécanique quantique, la paire (A2, B2) devient à son tour intriquée. Avec ces photons aux propriétés corrélées, Alice et Bob peuvent alors mettre en place une distribution quantique de clé.

