

Révolution quantique (4/5): de la Terre à la Lune sur Internet

PAR MICHEL DE PRACONTAL
ARTICLE PUBLIÉ LE LUNDI 8 AOÛT 2016



L'Internet quantique offre la promesse d'un paradis du traitement de l'information : puissance de calcul inégalée et sécurité parfaite. Mais il n'existe encore que sous forme de prototypes. Si les États-Unis et l'Europe s'y intéressent, la Chine mène la course en tête.

« *Un pas de géant pour l'Internet quantique* » : c'est ainsi que la revue scientifique *Nature* qualifie le satellite chinois **Ques**, qui doit être lancé au cours de ce mois d'août 2016 de la base de **Jiuquan**, en Mongolie-Intérieure. Cet engin de 600 kilos produit des paires de photons « jumeaux », des particules de lumière « intriquées », qui se comportent comme si elles s'influençaient mutuellement, même très éloignées l'une de l'autre. Le satellite émettra des paires de photons dirigés respectivement vers Pékin et Vienne, afin de tester les interactions quantiques sur de grandes distances.



L'Internet quantique © DR

La mission Ques (*Quantum Experiments at Space Scale*, soit *Expériences quantiques à l'échelle spatiale*), collaboration sino-autrichienne dont le coût est d'environ 90 millions d'euros, vise à préparer un futur Internet quantique. Ce dernier n'existe, à ce jour, que sur le papier. De quoi s'agit-il ? En substance, l'idée est de créer un réseau planétaire d'ordinateurs surpuissants fonctionnant selon les principes de la

théorie des quanta, et connectés par des lignes de télécommunication spéciales permettant de transporter à distance les états quantiques. Potentiellement, un tel système serait beaucoup plus rapide que l'Internet classique et mettrait à disposition des utilisateurs une puissance de calcul très supérieure. Il aurait aussi l'immense avantage de garantir le secret des communications avec un niveau de protection inégalable par les moyens actuels. Dans un système quantique, la sécurité des échanges est une caractéristique intrinsèque au traitement de l'information, car toute tentative de piratage est forcément détectée.

Bref, l'Internet quantique ressemble à un paradis de l'information. Mais il reste de nombreuses étapes à franchir avant de pouvoir atteindre cet éden numérique. Les ordinateurs quantiques n'en sont qu'à leurs balbutiements, comme on l'a vu dans les trois premiers épisodes de cette série. Même lorsqu'ils commenceront à fonctionner vraiment, ce qui devrait être le cas d'ici cinq à dix ans, assurer la liaison entre deux ou plusieurs machines quantiques constituera un défi complexe.

En effet, toute la magie des futures machines quantiques tient à leur capacité d'exploiter les propriétés « spéciales » des particules microscopiques telles que les électrons ou les photons. Ce qui donne aux bits quantiques, ou « qubits », leur efficacité, c'est le fait qu'ils peuvent se comporter d'une manière très différente des objets du monde classique, en utilisant des propriétés étranges comme la superposition d'états ou l'intrication (influence à distance entre particules).

Or, les propriétés des états quantiques sont fragiles, difficiles à contrôler, et ne peuvent pas être transportées par des lignes de télécommunication classiques. Pour transférer un état d'un ordinateur quantique à un autre, il faut se servir de la « téléportation », qui repose sur le mécanisme de l'intrication.

Soulignons que la téléportation quantique n'est pas celle qui se manifeste dans la série *Star Trek* et que symbolise la fameuse formule « *Téléportation, Scotty !* ». Lorsqu'il entend cette injonction,

l'ingénieur Montgomery Scott, alias « Scotty », actionne le bouton du « téléporteur » qui transporte instantanément le capitaine Kirk sur une planète inconnue. Au passage, si la téléportation est devenue l'un des éléments cultes de la série, c'était au départ une astuce de scénario pour éviter la mise en scène coûteuse du décollage et de l'atterrissage du vaisseau spatial.

Dans la téléportation « quantique », ce qui est transporté instantanément à distance n'est pas une personne, mais l'état d'une particule quantique, par exemple un photon. L'ingrédient essentiel de cette téléportation est l'intrication, la propriété de deux particules jumelles de se comporter comme si elles ne formaient qu'un seul objet. Si deux photons ont été « jumelés », ils continuent de former une paire indissociable, un ensemble unique, aussi loin soient-ils l'un de l'autre. Et lorsqu'on agit sur l'un d'entre eux, tout se passe comme si l'on agissait en fait sur l'ensemble. Une action sur l'un des jumeaux entraîne donc aussitôt un effet sur l'autre jumeau. Autrement dit, les photons jumeaux se comportent comme s'ils n'étaient pas « séparables », quelle que soit la distance entre eux.

Cette propriété étrange des particules jumelles a d'abord été décrite théoriquement par les fondateurs de la physique quantique, au grand dédain d'Albert Einstein qui moquait l'«*action surnaturelle à distance* » entre les particules intriquées (**voir le premier épisode**). Mais il a été prouvé expérimentalement dans les années 1980 que la « non-séparabilité » des particules intriquées était une réalité physique, ce qui a ouvert la voie à l'utilisation de la téléportation quantique comme moyen de communication.

De premiers tests ont été réalisés sur de courtes distances. Puis, en 2012, une équipe de physiciens dirigée par l'Autrichien Anton Zeilinger, à l'université de Vienne, a spectaculairement battu le record de distance franchie par la téléportation quantique : ces physiciens ont transféré les paramètres d'un photon à un autre, les deux particules se trouvant **dans deux**

observatoires distants de 143 kilomètres, situés sur deux des îles Canaries, l'un à La Palma et l'autre à Ténérife.

Les télécommunications quantiques ne peuvent pas être piratées

Les physiciens décrivent habituellement ces interactions bizarres en mettant en scène deux personnages fictifs, Alice et Bob. Résumons l'expérience de Zeilinger avec l'aide d'Alice et Bob. Alice est à La Palma, au « Jacobus Kapteyn Telescope » qui dépend du « Groupe Isaac Newton », un observatoire géré par le Royaume-Uni, les Pays-Bas et l'Espagne. Bob est à Ténérife, à la « Station optique au sol » de l'Agence spatiale européenne.

Zeilinger et ses collègues produisent une paire de photons intriqués, A et B. Le photon A est envoyé chez Alice, le photon B chez Bob. Puis Alice fait interagir son photon A avec un photon source S. Cela change l'état du photon A, dont Alice mesure alors les caractéristiques. À 143 kilomètres, chez Bob, le photon B prend instantanément l'état quantique de celui d'Alice. Si par exemple, la polarisation du photon A a été changée par l'interaction avec le photon S, la polarisation du photon B va prendre une valeur déterminée par celle de A.

Autrement dit, les physiciens ont transporté instantanément l'état du photon A se trouvant à La Palma sur le photon B se trouvant à Ténérife. Et cela, alors que A et B n'ont aucune interaction entre eux, et qu'il n'y a aucune communication entre Alice et Bob.



Émetteur quantique à La Palma © IQOQI

Problème : est-ce que cela n'implique pas qu'il y a eu un transfert d'information instantané à distance ? Un tel transfert serait contraire aux lois physiques et en

particulier à la théorie de la relativité, selon lesquelles une information ne peut pas voyager plus vite que la lumière.

En fait, les lois de la relativité sont respectées. Alice ne peut pas contrôler l'état téléporté, celui du photon A après interaction avec S. Cet état est régi par une loi probabiliste et n'est pas prévisible. Pour contrôler l'état de B et vérifier la relation entre les deux photons, Bob doit connaître le résultat de la mesure d'Alice. Et il ne peut le connaître que si Alice lui téléphone pour le lui indiquer, ou qu'elle utilise un autre moyen de communication, qui dans tous les cas ne transmettra aucune information à une vitesse supérieure à celle de la lumière.

Mais il y a plus : le transfert de l'état quantique du photon A sur le photon B ne peut pas être « piraté ». L'idée de base est que le fait de mesurer un objet quantique, par exemple un photon, modifie obligatoirement son état. Par conséquent, toute tentative d'intercepter un message quantique laisse inévitablement des traces détectables. Si Alice et Bob échangent une clé de cryptage codée sur des photons et qu'un hacker cherche à la lire, il sera forcément repéré. La communication quantique est donc intrinsèquement protégée contre les tentatives de surveillance ou d'intrusion.

De plus, l'intrication que nous avons décrite pour des paires de photons jumeaux peut s'étendre à un plus grand nombre de particules – théoriquement autant qu'on veut. En principe, l'Internet quantique pourrait permettre un bond exponentiel dans les possibilités de transport d'information et de calcul distribué, en toute sécurité. Cette perspective excitante se heurte

cependant, une fois de plus, à la dure réalité : en pratique, les systèmes quantiques sont délicats à manipuler et un rien peut les empêcher de fonctionner.



Récepteur quantique à Ténérife © IQOQI

Dans presque toutes les expériences de téléportation quantique réalisées jusqu'ici, on a utilisé des photons comme support d'information. Pour faire communiquer les futures machines quantiques entre elles, on pourrait se servir de photons circulant à l'air libre ou dans des fibres optiques. Le record de 143 kilomètres de Zeilinger établi en 2012 l'a été à l'air libre ; peu de temps avant, une équipe chinoise avait réussi une expérience similaire au-dessus du lac Qinghai, sur une distance de 97 kilomètres.

Il n'est pas du tout certain que l'on puisse aller beaucoup plus loin : les photons à l'air libre subissent les turbulences de l'atmosphère, de sorte qu'il est très difficile d'amplifier un signal tout en préservant leur fragile état quantique. Une solution de rechange est de faire circuler les photons dans des fibres optiques. L'année dernière, des chercheurs du National Institute of Standards and Technology (NIST), à Boulder, Colorado, **ont réussi à téléporter des états quantiques sur 100 kilomètres au moyen de fibres optiques.**

Mais le système n'est guère efficace : « *Seulement 1 % des photons réussit à parcourir les 100 kilomètres de fibres* », dit l'un des participants à l'expérience, Marty Stevens, qui explique que le signal obtenu était si faible qu'il n'aurait pas été décelé sans le secours de nouveaux détecteurs ultrasensibles.

« Nous avons besoin d'explorer l'inconnu »

Les complications de la circulation des photons sur terre ont conduit les chercheurs chinois de l'université de science et de technologie de Heifei à s'intéresser à l'espace. D'où le satellite Quess, dont le principal

instrument est un cristal qui produit des paires de photons intriqués. Au cours de cette mission qui doit durer deux ans, l'équipe chinoise, dirigée par Jian Wei Pan, un ancien étudiant de Zeilinger, en association avec le groupe de Vienne, va mener plusieurs expériences.



Le satellite de télécommunication quantique Quesst © Académie chinoise des sciences

La première consistera à établir des liaisons avec les stations au sol à Pékin et à Vienne, et à générer des clés de chiffrement quantiques permettant des communications totalement sûres. Les messages protégés par de telles clés ne peuvent être piratés, car si un tiers cherche à intercepter la clé quantique, il est obligé d'effectuer l'équivalent d'une mesure, ce qui modifie l'état quantique correspondant à la clé interceptée. Autrement dit, toute tentative de piratage sera inévitablement détectée par les parties qui cherchent à communiquer (**voir le deuxième épisode**).

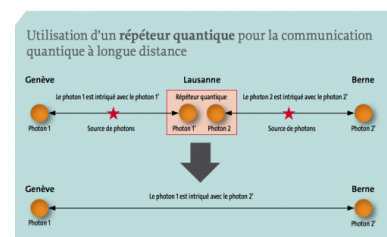
Dans une autre expérience, la mission Quesst tentera de vérifier expérimentalement l'intrication des particules à une distance de 1 200 kilomètres, et à téléporter des états quantiques sur des distances plus grandes que celles qui ont été atteintes sur terre. Si ces premières expériences réussissent, la Chine envisage d'envoyer jusqu'à une vingtaine de satellites, permettant des communications à travers la planète entière.

D'autres expériences sont en cours. Une équipe canadienne veut produire des photons intriqués au sol et les envoyer ensuite dans l'espace vers un microsatellite de 30 kilos. Une équipe italienne, à l'université de Padoue, projette d'équiper des satellites ordinaires de réflecteurs, et de faire rebondir des photons dessus. Des chercheurs projettent par ailleurs de mener une expérience quantique à bord de la **station spatiale internationale**.

La téléportation d'états quantiques à grande échelle se heurte à une difficulté physique : à mesure que la distance augmente, une proportion de plus en plus importante des photons intriqués disparaît, de sorte qu'à partir d'un trajet d'une certaine longueur le signal devient indétectable.

Pour y remédier, il faut utiliser des « répéteurs quantiques », l'équivalent des relais utilisés dans les télécommunications classiques. Ces derniers amplifient le signal affaibli et le retransmettent ainsi renforcé, sans modifier l'information qu'il véhicule. Les répéteurs quantiques sont étudiés depuis une vingtaine d'années. Ils font appel à différents procédés visant à corriger les pertes de photons le long des fibres optiques ainsi que les erreurs. Une analyse récente de ce sujet très technique a été publiée début 2016 dans les *Scientific reports* de la revue *Nature* (**lire ici**).

Décrire les différents types de répéteurs quantiques sortirait du cadre de cet article. Mais on peut illustrer le principe général par l'exemple d'un dispositif testé en 2012 par l'équipe de Nicolas Gisin, à l'université de Genève. Les chercheurs genevois ont réussi à « stocker » durant une microseconde le premier membre d'une paire de photons intriqués dans un cristal et le récupérer ensuite, sans que son intrication avec le deuxième ait été rompue. En termes informatiques, l'opération équivaut au stockage momentané d'un bit quantique – un qubit – dans une mémoire solide. Ce dispositif **pourrait jouer le rôle de répéteur** dans un réseau quantique (voir le schéma ci-dessous).



Dispositif prototype de répéteur quantique développé à l'université de Genève © DR

Dans le futur Internet quantique, les répéteurs ne devront pas être placés au hasard, mais installés d'une manière qui permette des communications efficaces. Michael Epping, de l'université de Düsseldorf, a montré récemment que l'on pouvait optimiser l'architecture des réseaux quantiques en **utilisant la**

théorie mathématique des graphes. Un graphe est un objet mathématique abstrait qui permet de représenter un réseau en détaillant ses caractéristiques. Grâce aux graphes, il sera possible de comparer différents réseaux quantiques produisant le même état et de déterminer lequel transmettra l'information quantique sur la plus grande distance.

Avant d'en arriver là, il faudrait déjà disposer d'un réseau existant physiquement, et pas seulement sur le papier. Les États-Unis s'intéressent vivement, mais discrètement, à l'Internet quantique. Il y a trois ans, en mai 2013, l'équipe de Richard Hughes, du Laboratoire national de Los Alamos, au Nouveau-Mexique, a révélé qu'elle avait testé en secret, durant deux ans et demi, un réseau quantique à petite échelle. Ce réseau est construit autour d'un foyer central, et pour envoyer un message d'un point à un autre du réseau, il faut toujours passer par le centre. Selon Hughes et ses collègues, leur réseau permet de communiquer des messages quantiques en sécurité. Cependant, il semble difficile de construire un réseau à l'échelle planétaire selon ce procédé, qui n'est donc probablement pas un modèle pour le futur web quantique.

L'Europe s'intéresse aussi à l'Internet quantique, mais ne le voit pas pour tout de suite. Le « **Quantum manifesto** », feuille de route pour le développement des technologies quantiques lancée par l'Union européenne en mai dernier, présente comme un objectif à long terme (d'ici à 2030 ou plus tard) de « *créer un Internet quantique sûr et rapide reliant les plus grandes villes d'Europe* ».

Aujourd'hui, ce sont les Chinois qui mènent la course en tête, à la fois dans l'espace et au sol. Depuis plusieurs années, ils ont entrepris de construire un réseau de télécommunications quantiques entre plusieurs villes de Chine, dont une ligne de 1 000 kilomètres, qui reliera Pékin à Shanghai. Du côté spatial, Jian Wei Pan et ses collègues de l'université de Hefei ont un nouveau projet : ils veulent lancer un satellite destiné à faire circuler des particules intriquées entre la Terre et la Lune. « *Nous avons besoin d'explorer l'inconnu* », **explique Pan dans la revue Nature**.

Directeur de la publication : Edwy Plenel

Directeur éditorial : François Bonnet

Le journal MEDIAPART est édité par la Société Editrice de Mediapart (SAS).

Durée de la société : quatre-vingt-dix-neuf ans à compter du 24 octobre 2007.

Capital social : 28 501,20€.

Immatriculée sous le numéro 500 631 932 RCS PARIS. Numéro de Commission paritaire des publications et agences de presse : 1214Y90071 et 1219Y90071.

Conseil d'administration : François Bonnet, Michel Broué, Gérard Cicurel, Laurent Mauduit, Edwy Plenel (Président), Marie-Hélène Smiéjan, Thierry Wilhelm. Actionnaires directs et indirects : Godefroy Beauvallet, François Bonnet, Laurent Mauduit, Edwy Plenel, Marie-Hélène Smiéjan ; Laurent Chemla, F. Vitrani ; Société Ecofinance, Société Doxa, Société des Amis de Mediapart.

Rédaction et administration : 8 passage Brulon 75012 Paris

Courriel : contact@mediapart.fr

Téléphone : + 33 (0) 1 44 68 99 08

Télécopie : + 33 (0) 1 44 68 01 90

Propriétaire, éditeur, imprimeur : la Société Editrice de Mediapart, Société par actions simplifiée au capital de 28 501,20€, immatriculée sous le numéro 500 631 932 RCS PARIS, dont le siège social est situé au 8 passage Brulon, 75012 Paris.

Abonnement : pour toute information, question ou conseil, le service abonné de Mediapart peut être contacté par courriel à l'adresse : serviceabonnement@mediapart.fr. ou par courrier à l'adresse : Service abonnés Mediapart, 4, rue Saint Hilaire 86000 Poitiers. Vous pouvez également adresser vos courriers à Société Editrice de Mediapart, 8 passage Brulon, 75012 Paris.