

Cent ans de révolutions quantiques
Colloque du 24 mai 2016 à l'Académie des Sciences
De Newton à la téléportation quantique
Nicolas Gisin, Université de Genève (Suisse)

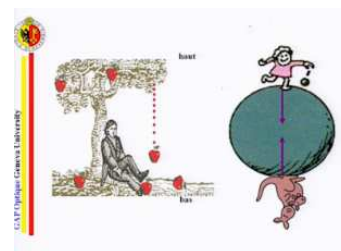


Nicolas GISIN

Nicolas Gisin, professeur à l'Université de Genève, est un expert des communications quantiques. Il s'intéresse à la fois aux questions de fondement de la physique quantique et à ses applications. Il a obtenu deux des prestigieuses bourses européennes ERC Advanced Grant puis, en 2009, il a été le premier lauréat du prix John Steward Bell. En 2014, la fondation Marcel Benoist lui a octroyé le prix Science Suisse, la plus haute distinction scientifique suisse.

« Étrangement, la physique nous a de tout temps présenté une vision du monde non locale, sauf durant une petite fenêtre d'environ 10 ans entre la relativité générale et la mécanique quantique. Toutefois, la non-localité chez Newton diffère profondément de la non-localité quantique. En particulier, cette dernière a été confirmée expérimentalement. De plus, la non-localité quantique permet des applications fascinantes telles que la cryptographie et la téléportation quantique »

Je vais commencer par quelque chose que le grand public connaît, à savoir que les objets ont tendance à tomber de « en haut vers en bas ». En fait le grand public en sait davantage, il sait également que les objets ont tendance à tomber vers le centre de la Terre et c'est pourquoi les kangourous tiennent sur la Terre de l'autre côté.



Le grand public sait également que ceci ne s'applique pas qu'aux objets terrestres mais également à la Lune. La Lune a tendance à tomber vers le centre de la Terre mais heureusement, en même temps qu'elle tombe, elle avance et donc avec ce mouvement conjoint elle tombe à côté de la Terre, elle avance vers le bas et ceci explique que cette Lune orbite autour de la Terre.

Le grand public reconnaît probablement l'équation : $F = G \cdot m m' / r^2$, mais on en n'a pas besoin de cette belle équation aujourd'hui.

Le grand public a fait beaucoup de physique, sans même s'en rendre compte, il y a déjà très longtemps, par exemple, quand vous aviez 6 mois, une année... ; à cet âge on apprend beaucoup de physique de base. Par exemple à 6 mois, si vous vouliez interagir avec un objet vous avez découvert qu'il y a plusieurs possibilités, par exemple ramper vers lui ou lancer un objet, une balle par exemple ou encore allonger votre bras à l'aide d'un bâton, mais il n'y a pas trente-six mille façons de faire. Il s'agit d'expériences que l'on réalise très tôt dans la vie et donc qui sont profondément ancrées en nous. Une autre expérience que nous avons essayé un peu plus tard c'est la télékinésie. Tous, on a essayé de s'asseoir, de se concentrer fortement en espérant que l'objet souhaité arrive vers nous. Il est important de faire cette expérience pour se rendre compte que **ça ne marche pas**. On peut toujours rester assis, mais en fait il faut hurler pour que maman ou quelqu'un d'autre vienne résoudre le problème.



L'étape suivante je sais qu'absolument tout le monde y adhère. Je pense que tout le monde dans cette salle va comprendre que la télépathie ne marche pas plus que la télékinésie.

Ça ne marche pas dans le sens **qu'aucune information ne va d'un endroit à un autre sans support physique**. Qui ou quoi porterait cette information ?

Autrefois cette information on l'envoyait par cartes postales, aujourd'hui ça ne se fait plus, même si l'on a toujours plaisir à en recevoir. Les emails ça s'envoie aussi avec un support physique, des électrons.

Donc : « **Sans support physique il n'y a pas transmission de l'information** »

En d'autres termes il n'y a pas de télépathie. Alors le grand public va se poser la question :

« **Dis papa/ maman comment elle fait la Lune pour savoir dans quelle direction elle va tomber ?** »

Vous pensez que c'est une question infantile et c'est une question enfantine donc c'est une question de physicien. Les physiciens sont de grands enfants.

Quand vous êtes dans un avion à 10 000 m d'altitude, mettons que nous fermions les yeux, vous détachez même votre ceinture de sécurité. Vous ne vous mettez pas à flotter dans l'avion, votre corps il sait toujours dans quelle direction il doit, non pas tomber, car il y a le siège qui vous retient, mais où aller. Comment il fait votre corps pour savoir dans quelle direction est la Terre ? Vous avez les yeux fermés, il n'y a rien qui vous attache, pourtant ça marche, vous avez tous essayé. C'est une question vraiment sérieuse, est-ce que la Lune utilise une sorte de bâton pour sonder la présence de la Terre ou est-ce qu'elle lui lance des sortes de balles ? Comment savoir dans quelle direction elle doit tomber ? Cet exemple de bonne question va nous permettre de faire de la vraie physique. Cette question, un autre grand enfant célèbre se l'est posée : Isaac Newton. Il a écrit dans une lettre à Richard Bentley en 1692 : « *Que la gravité soit innée, inhérente et essentielle à la matière, en sorte qu'un corps puisse agir sur un autre à distance au travers du vide, sans médiation d'autre chose, par quoi et à travers quoi leur action et force puissent être communiquées de l'un à l'autre est pour moi une absurdité dont je crois qu'aucun homme, ayant la faculté de raisonner de façon compétente dans les matières philosophiques, puisse jamais se rendre coupable* » .

En d'autres termes, Newton disait ainsi qu'il faut être fou pour croire à la gravitation universelle ! Néanmoins cette théorie a dominé la science pendant plus de trois siècles et elle est encore enseignée aujourd'hui.

Je vous avoue que j'ai honte quand je me rappelle à quel point je trouvais cette théorie magnifique, belle et convaincante, alors qu'elle est absolument absurde. On devrait, en même temps qu'on l'enseigne, le dire aux jeunes. Pourquoi est-elle absurde ? Si l'on prend la théorie de la gravitation à la lettre : si l'on

déplaçait un rocher sur la Lune, par exemple à l'aide d'une petite fusée, cela aurait un **effet immédiat** sur notre poids sur Terre et donc en décidant de déplacer ou non le rocher, **transmettre instantanément** une information sur Terre et en plus une information qui n'est portée par rien.

En réalité, au lycée nous enseignons la télépathie !

Puisque la physique est une science expérimentale il faudrait faire une expérience. Si on l'avait faite on aurait tout de suite remarqué que la théorie de Newton est fautive disons au moins limitée en tous cas. On aurait également remarqué que la gravité se propage à la vitesse de la lumière. Cette expérience n'a jamais été faite, même de nos jours, car on ne dispose pas de la technologie nécessaire. Il a fallu attendre Einstein pour répondre à la question enfantine. Comment fait la Lune pour savoir dans quelle direction tomber ? La réponse est dans la théorie de la relativité générale.

En gros la Terre, la Lune ou n'importe quel corps lance en permanence des petites balles dans toutes les directions, qui informent l'ensemble de l'Univers ; ces petites balles s'appellent des gravitons qui



n'ont pas de masse, tout comme les photons et qui se déplacent à la vitesse de la lumière. C'est une superbe résolution du dilemme que Newton a soulevé il y a 3 siècles. Et puisque c'est de la physique il y a des conséquences. Une des conséquences c'est qu'en fait la Lune ne tombe pas exactement vers le centre de la Terre puisqu'elle ne sait où est le centre de la Terre. Elle sait où était le centre de la Terre environ une seconde plus tôt. La Lune située à environ 300 000 km de la Terre (un peu plus en réalité), il faut en gros une seconde pour que l'information arrive à la Terre. La Lune ne tombe pas exactement au centre de la Terre mais un peu à côté. Cet effet de retard de la Lune est négligeable mais sur Mercure qui tourne très près du Soleil cet effet est mesurable et c'est d'ailleurs cet effet qui a été la première confirmation de la théorie de la relativité. Ce n'est pas beau la physique ?



Environ 10 ans après la RG qui a vraiment fait rentrer la localité dans la physique (jusque-là on avait des théories non locales) apparaît la Physique quantique qui décrit les atomes et les photons.

Cette théorie est basée sur une magnifique équation celle de Schrödinger :

$$\dot{\Psi} = -i \cdot H \cdot \Psi$$

Cette équation fut découverte alors que Schrödinger passait ses vacances avec une amie en Suisse à Arosa dans le Canton des Grisons. Un pays qui inspire ! J'espère que vous appréciez la beauté de cette équation ? Elle décrit en gros le mouvement des électrons autour du noyau. Ψ décrit l'état de ces fameux atomes. Le point sur Ψ signifie qu'il s'agit d'équation d'évolution dans le temps. H représente l'énergie.

Evidemment le même enfant posera la question :

Dis papa/maman comment ils font les électrons pour savoir où est le noyau ?

Autour de quel point central faut-il tourner ? Cherchons les gravitons dans ce cas. En fait c'est un peu plus compliqué parce que la dimension de l'atome est tellement petite que l'on ne peut pas faire le même genre d'expérience que celle suggérée pour la Lune et la Terre en déplaçant un rocher sur la Lune. Une image un peu plus correcte de l'atome ce serait quelque chose comme un ensemble de bulles de savon qui se touchent l'une l'autre. Si on touche une bulle de savon elle éclate en plusieurs points. En termes techniques on parlera de « réduction de la fonction d'onde ». Les électrons occupent un certain volume ; Ils se touchent quasiment les uns les autres et avec le centre de



l'atome où se trouve le noyau. Pas commode pour notre recherche de graviton. On va être malin, on va mettre un atome sur la Lune et l'autre sur la Terre comme cela la distance sera grande. En réalité on ne va pas prendre un atome car c'est déjà trop compliqué on va choisir le système quantique le plus simple, un système quantique à seulement deux niveaux, des bits quantiques ou Qbit.

Dans la théorie de l'information d'aujourd'hui, vous savez ce qu'est un « bit »: c'est « 1 » ou « 0 ».

Comme une pièce de monnaie avec un côté pile et un côté face. Lorsqu'on téléphone notre voix va être digitalisée c'est-à-dire transformée en chaîne de bits, une suite de « 1 » et de « 0 ».

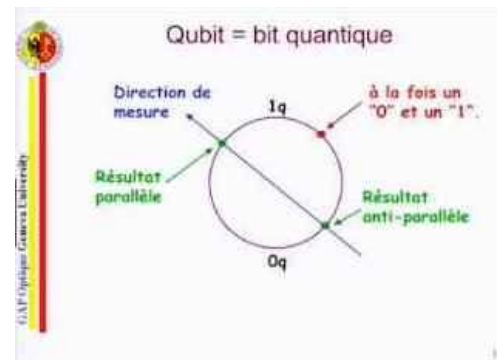
Pour les Qbits, on a à la fois « 1 » et « 0 » ! C'est un concept typiquement quantique dans lequel les choses peuvent être à la fois ci et ça.

On peut imaginer dans chaque photon une « direction » verticale (l'équivalent du « 1 » d'un bit) et une « direction » horizontale (ce serait l'équivalent du « 0 ») et on peut représenter l'ensemble des états possibles d'un « Qbit », ou bit quantique, par un cercle. Une possibilité ce serait un point rouge sur ce cercle qui représenterait à la fois « 1 » et « 0 ».

Si on fait une mesure selon une « direction » choisie (trait bleu), on obtiendra comme résultat soit « parallèle » si le photon passe, soit « antiparallèle » si le photon ne passe pas. On ne peut avoir que ces deux seuls résultats ils sont « quantifiés ».

Ce qui est important c'est que nous physiciens pouvons choisir la direction de mesure mais pas le résultat. Le résultat c'est la nature qui nous le donne et il n'y a que deux résultats possibles : le résultat « parallèle » ou « antiparallèle ». C'est pour cela que l'on parle d'un « bit ».

Ceci décrit l'objet quantique le plus simple qui soit. Maintenant on peut prendre un deuxième objet quantique. On va les séparer par une grande distance. Par exemple Alice est sur la Lune et Bob sur la Terre.



Lorsque que l'on a deux Qbits (une paire de photons, d'électrons ou d'atomes) on peut les « intriquer ».

Propriétés de deux Qbits intriqués

Propriété 1 : si je fais des mesures dans la même direction (chez Alice et chez Bob) j'obtiens toujours le même résultat.

Propriété 2 : Supposons que je prenne chez Alice et chez Bob des directions de mesure opposées (l'une parallèle, l'autre antiparallèle) dans ce cas les résultats sont opposés.

Propriété 3 : Si les deux directions ne sont pas exactement les mêmes mais proches les résultats sont proches.

Alice peut choisir une direction de mesure. De même Bob peut choisir sa direction. Ensuite il y a tout un jeu, le « jeu de Bell » ou « inégalités de Bell ».

Je ne vais pas en parler mais ce qui est important c'est de comprendre que les deux bits quantiques, les deux objets qui sont « intriqués » signifient que si je touche l'un des deux, l'autre tressaille aussi et même IMMEDIATEMENT. Ça c'est l'une des conséquences de l'intrication, l'autre étant que si Alice et Bob décident de faire des mesures dans la même direction, à une même mesure ils vont nécessairement obtenir les mêmes résultats. Notons que l'intrication est alors maximale (mais il existe aussi des intrications partielles).

Donc même mesure = même résultat

Par même résultat je veux dire que les deux vont obtenir, le résultat « parallèle » ou « antiparallèle ».

Donc une corrélation parfaite.

La théorie quantique prévoit que l'effet est immédiat. Comme pour la théorie de Newton ; alors on va chercher l'équivalent des gravitons des « qgravitons ».

On a fait de telles expériences pour chercher des « qgravitons ». Je vous montre celle de Genève.

Le lac de Genève est au milieu et on a deux villages, l'un situé à l'est l'autre à l'ouest : Satigny et Jussy.



On ajuste les longueurs des fibres optiques de telle sorte que nos résultats des mesures obtenues soient bien synchrones. Et l'on s'est dit : si l'effet est vraiment immédiat on ne va rien voir mais si quelque chose porte l'information, si ce n'est pas de la télépathie, on va peut-être observer un certain délai.

Ceux qui connaissent bien la théorie de la relativité vont se dire : on va aligner cela dans quel

référentiel ? En fait, on a pris d'abord le référentiel de Genève ; on utilise le fait que c'est aligné dans la direction est – ouest et que, en faisant l'expérience pendant 12 h, grâce à la rotation de la Terre on va scanner tous les référentiels possibles, alors, quel que soit le référentiel dans lequel se propage cet hypothétique influence entre Alice et Bob, sur un laps de temps de 12 h on devrait percevoir un délai s'il y en a un..

Conclusion de cette expérience si ces « qgravitons » existent, ils doivent se propager au moins à la vitesse de 100 000 fois celle de la lumière...

A la vitesse de la lumière c'est impossible, à 100 000 la vitesse de la lumière c'est ... 100 000 fois impossible. Donc il n'y a pas de « qgravitons » !

Dis papa/maman comment ils font les bits quantiques pour toujours donner la même réponse aux mêmes questions ?

Une hypothèse serait de dire qu'ils se sont préparés à l'avance. Comme avec deux bons étudiants. Si vous leur posez la même question vous n'êtes pas surpris qu'ils vous donnent la même réponse.

La violation expérimentale des inégalités de Bell prouve que les « Qbits » n'ont pas appris à l'avance la question et la réponse, et qu'ils n'ont pas non plus « communiqué », sinon à une vitesse inimaginable.

Dis papa/maman est-ce que l'on peut utiliser la téléportation quantique pour faire de la télépathie ?

On veut éviter l'explication par la télépathie mais on ne peut pas éviter ces corrélations produites par l'intrication. Peut-on utiliser l'intrication pour faire de la télépathie ; c'est-à-dire transmettre de l'information sans aucun support physique ?

Pour cela il faut parler de « **hasard** » « **non local** ».

Le Hasard est déjà un concept difficile et il faut lui rajouter « non local »

En gros si le résultat d'Alice, par exemple parallèle, était prédéterminé, Bob pourrait le connaître. Si c'est quelque chose qui existe, la physique finira par le savoir. Si le résultat d'Alice était prédéterminé alors Bob pourrait le connaître, pas aujourd'hui mais un jour. Mais à ce moment Bob pourrait déduire de son résultat de mesure le choix de mesure de la direction de mesure fait par Alice.

Ce serait de la télépathie. Comme la télépathie est impossible c'est que l'hypothèse au départ est fautive (un raisonnement par l'absurde).

Le résultat d'Alice ne pouvait pas être prédéterminé. Donc le résultat d'Alice doit-être produit au hasard. Donc soit vous croyez à la télépathie, soit vous croyez au hasard ; il n'y a plus de troisième solution.

Dis papa/maman c'est quoi le hasard ?

Question difficile. En gros c'est un **événement intrinsèquement non prévisible**, donc un acte de **pure création**.

C'est assez étonnant que la physique en arrive à parler d'un acte de pure création, ça fait pas très physique. « Au hasard » signifie qu'un événement n'était pas là avant. Il est là après. Il vient d'où ? Il vient « au hasard », il vient de l'extérieur de l'espace et du temps, un acte de pure création.

Pour les physiciens c'est difficile de penser le hasard. Le hasard est-ce ce qui différencie la « non localité quantique » de la « non localité » de Newton. Le hasard est-ce ce qui empêche d'utiliser la « non localité » quantique pour des communications sans support physique.

Le hasard c'est ce qui empêche la télépathie. Chez Newton on pouvait transmettre de l'information, en physique quantique **on ne peut pas**. Ce qui empêche la communication c'est le hasard.

Un peu de philosophie : l'intrication c'est le terme scientifique pour dire « hasard non local ». C'est une nouvelle forme de causalité.

L'intrication quantique est une nouvelle forme de causalité

La causalité standard c'est Alice qui influence Bob ou le contraire donc une cause directe ou bien une cause commune qui provient du passé. En ce moment je suis en train de corrélérer les gens aux deux extrémités de la salle qui entendent le même discours. Là il y a vraiment une cause commune qui vient du passé et se propage à la vitesse du son vers les extrémités de la salle.

Une fois que l'on admet l'existence d'un vrai hasard, rien n'empêche ce vrai hasard de se manifester **en plusieurs endroits**, du moment que cela ne permet pas la télépathie.

Si vous acceptez le hasard, pourquoi ce hasard devrait-il se manifester en un seul endroit ?

Le vrai hasard, en particulier « le hasard non local » surgit en quelque sorte à l'extérieur de l'espace et du temps, dans ce sens où aucune histoire se déroulant à l'extérieur de l'espace au cours du temps ne peut se raconter. Pour raconter le hasard quantique, soit on passe par l'espace de Hilbert et un opérateur spécial, soit on raconte une histoire qui va utiliser des outils de narration qui sortent de l'habitude. On va parler du « hasard non local ». Une fois que l'on aura accompli tout cela on va pouvoir faire de la téléportation.

Pour faire de la téléportation on commence par avoir 2 qbits intriqués, ce qui signifie : même question implique même réponse. Ce sera notre canal de téléportation quantique.

Maintenant je prends un « Qbit » à téléporter, il faut ici que je fasse quelque chose.

Là c'est l'émetteur de l'objet à téléporter : le « Qbit » qui porte l'état à téléporter, là l'émetteur, là le récepteur. Là il va falloir faire quelque chose ; pour envoyer une lettre on met la lettre dans une enveloppe mais ici on est dans le domaine quantique il est nécessaire qu'émetteur et récepteur interagissent.

Si je mesure l'un ou l'autre, je vais le détruire, le perturber, donc ce n'est pas cela qu'il faut faire. Je dois faire une mesure conjointe de ces deux objets. Je vais leur poser une question typiquement quantique (aux deux), une question un peu tordue comme les physiciens savent le faire. La question est la suivante : « *si je vous posais la même question à tous les deux me donneriez-vous la même réponse ?* »



Dans le cas de deux étudiants on pose la même question au premier puis au second étudiant, puis l'on compare les réponses. Mais puisque ce sont des « Qbits », ces bits quantiques peuvent répondre à cette question par

exemple positivement **en se mettant dans un état intriqué**, puisque c'est précisément ça la caractéristique de l'intrication ; c'est donner la même réponse quelle que soit la même question posée aux deux. Les deux Qbits peuvent répondre « oui » en se mettant ensemble dans un état intriqué.

Le « Qbit » à téléporter donne toujours la même réponse que le Qbit d'Alice mais le « Qbit » d'Alice donne toujours la même réponse que le « Qbit » de Bob. Donc finalement le qbit de Bob, quelle que soit la direction sur laquelle je le mesure donne toujours la même réponse que m'aurait donnée le « Qbit » à téléporter.

Donc si la réponse à cette question est oui alors toute mesure de « Qbit » de Bob donnera le même résultat que si la mesure avait été faite sur le qbit à téléporter. En gros c'est ça la téléportation quantique. Presque, parce que là la réponse à la question est oui mais ceci est une question qu'on pose à un système quantique donc il y a toujours plusieurs réponses qui viennent au hasard et la réponse pourrait aussi être non. Alors si la réponse est non, ça veut dire qu'ils donnent toujours des résultats opposés ; il donne toujours une réponse opposée à celle du Qbit à téléporter donc à ce moment-là ce

que je dois faire c'est retourner le Qbit de Bob. C'est-à-dire faire une transformation unitaire qui corrige ; avec le Qbit de Bob retourné on aura la même réponse que le Qbit à téléporter.



Mais le problème est que Bob ne sait pas s'il doit retourner son Qbit ou pas. Pour savoir ça il faut que Alice lui communique la réponse qu'elle a reçue à sa question donc elle va transférer un bit d'information. Vous voyez que les Qbit ne sont pas des cercles mais des sphères et il ne faut pas transmettre un bit d'information (oui/non) mais il faut en transmettre deux.

Mais sur le principe c'est la même chose c'est parce qu'il faut transmettre ce bit d'information que la téléportation quantique n'est finalement pas supralumineuse. L'information ne va pas plus vite que la lumière, il faut que Bob reçoive cette information de la part d'Alice pour savoir s'il doit retourner son Qbit ou pas.

La téléportation ça ressemble un peu à ça



En savoir plus :

<http://www.podcastscience.fm/dossiers/2013/04/28/l'impensable-hasard-retranscription-de-l'interview-de-nicolas-gisin/>

CR de **Christian Larcher**



© B.Eymann