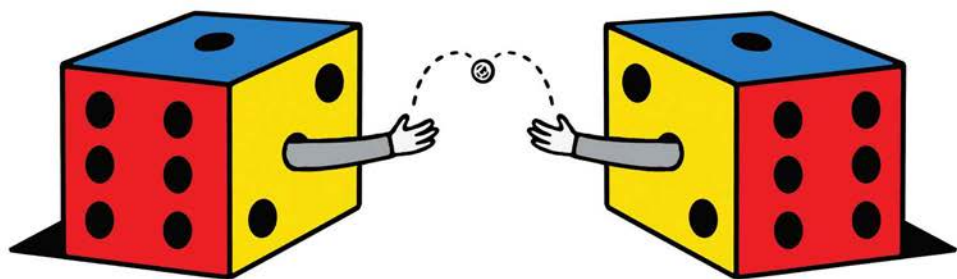


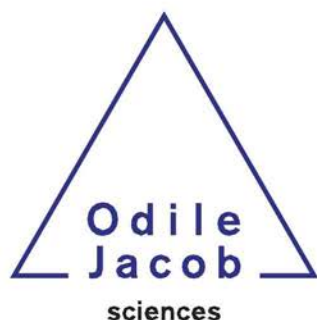
NICOLAS GISIN

L'IMPENSABLE HASARD

NON-LOCALITÉ, TÉLÉPORTATION
ET AUTRES MERVEILLES QUANTIQUES



préface de
Alain Aspect



L'Impensable Hasard

Nicolas Gisin

L'Impensable Hasard

*Non-localité, téléportation
et autres merveilles quantiques*

Préface d'Alain Aspect



© ODILE JACOB, SEPTEMBRE 2012
15, RUE SOUFFLOT, 75005 PARIS

www.odilejacob.fr
--

ISBN : 978-2-7381-7869-5

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

PRÉFACE

« Un coup de foudre ! »

Quand j'ai entendu Nicolas Gisin décrire ainsi son émotion lorsqu'il a pris connaissance du théorème de Bell, j'ai immédiatement revécu ce jour d'automne 1974 où je me suis plongé dans une copie de l'article de John Bell, peu connu à l'époque, et où j'ai compris qu'il était possible d'apporter une réponse expérimentale au débat fondamental qui avait opposé Bohr et Einstein sur l'interprétation du formalisme quantique. Si quelques physiciens connaissaient le problème d'Einstein, Podolsky et Rosen (EPR), bien peu avaient entendu parler des inégalités de Bell, et guère plus nombreux étaient ceux qui pensaient que les questions relatives aux fondements conceptuels de la mécanique quantique étaient dignes d'attention. L'article EPR, publié en 1935 dans la *Physical Review*, était facilement accessible dans les grandes bibliothèques, mais il n'en était pas de même de l'article de John Bell, paru dans une obscure revue nouvelle qui allait disparaître après seulement quatre numéros. À l'époque, pas d'Internet ni de bibliothèque en ligne, et la diffusion d'articles publiés ailleurs que dans les grandes revues reposait sur des photocopies. Je tenais la mienne d'un dossier qu'avait constitué un jeune professeur de l'Institut d'optique, Christian Imbert. Tombé sous le charme de l'article de Bell, je décidai que ma thèse porterait sur les tests expérimentaux des inégalités de Bell, et Christian Imbert accepta de m'accueillir dans son laboratoire.

Dans l'article de Bell, d'une clarté impressionnante, j'identifiai ce qui constituait le défi ultime pour les expérimentateurs : modifier les orientations des appareils de mesure pendant que les particules « intriquées » se propageaient de la source aux zones de mesure, afin d'interdire par le principe de causalité relativiste – qui interdit aux effets physiques de se propager plus vite que la lumière – toute possibilité d'une influence de chacune de ces orientations sur le mécanisme d'émission, ou sur la mesure éloignée. Avec une telle expérience, on aurait la quintessence du conflit entre, d'une part, la mécanique quantique et, d'autre part, la conception du monde défendue par Einstein, le *réalisme local* : selon ce point de vue, on peut parler de la *réalité physique* d'un système localisé dans une zone finie d'espace-temps, et cette réalité physique ne peut pas être influencée (*localité*) par ce qui arrive à un deuxième système séparé du premier par un intervalle de l'espace-temps « du genre espace », situation dans laquelle les deux systèmes ne peuvent communiquer sauf à admettre l'existence d'influences se propageant plus vite que la lumière. Si l'expérience confirmait les prédictions de la mécanique quantique, il faudrait renoncer au réalisme local, vision du monde défendue de façon convaincante par Einstein. Il serait alors tentant de se demander s'il faudrait renoncer au réalisme ou à la localité.

La remise en cause de la notion même de réalité physique ne me convainc pas, car il me semble que le rôle du physicien est de décrire la réalité du monde, et pas seulement d'être capable de prédire les résultats que donnent les appareils de mesure. Mais alors, si la mécanique quantique est confirmée – comme nous devons aujourd'hui l'accepter –, faut-il admettre l'existence d'interactions non locales, en violation apparente du principe de causalité relativiste d'Einstein ? Et peut-on rêver d'utiliser cette non-localité quantique pour transmettre un signal utilisable (allumer une lampe, passer un ordre de bourse) plus vite que la lumière ? C'est ici qu'entre en jeu une autre caractéristique spécifique de la mécanique quantique : l'existence d'un *indéterminisme quantique fondamental*, l'impossibilité absolue d'orienter le résultat d'une expérience particulière lorsque la mécanique quantique prédit que plusieurs résultats sont possibles. Certes la mécanique quantique permet de

calculer avec précision les probabilités de ces divers résultats, mais elles n'ont de signification que statistique, l'expérience étant répétée un grand nombre de fois, et ne nous disent rien sur le résultat d'une expérience particulière. C'est le *hasard quantique fondamental* qui interdit la possibilité d'une communication plus rapide que la lumière.

Parmi les nombreux livres ayant pour but d'expliquer au grand public les progrès récents en physique quantique, le livre de Nicolas Gisin tranche en mettant l'accent sur le rôle majeur de ce hasard quantique fondamental, sans lequel on pourrait imaginer un télégraphe supraluminique. S'il devenait réalité, ce mythe de science-fiction exigerait une révision radicale de la physique que nous connaissons. Loin de moi l'idée qu'il y ait des lois physiques à tout jamais intouchables – bien au contraire, je suis intimement convaincu que toute théorie physique sera tôt ou tard supplantée par une théorie embrassant un champ plus vaste. Mais certaines d'entre elles sont si fondamentales que leur mise en cause demandera une révolution conceptuelle d'une ampleur inouïe, dont nous avons eu quelques exemples dans l'histoire de l'humanité mais dont on sait bien qu'elles sont tellement exceptionnelles qu'on ne peut les envisager sans souligner leur caractère extrême. Dans ce contexte, expliquer pourquoi la non-localité quantique, si extraordinaire soit-elle, ne permet pas de renverser la causalité relativiste qui interdit la communication supraluminique, me semble un point particulièrement important dans le livre de Nicolas Gisin.

Que ce livre tranche, par rapport à d'autres ouvrages de vulgarisation, ne doit pas nous étonner puisque Nicolas Gisin a été un acteur majeur de la nouvelle révolution quantique qui s'est produite dans le dernier quart du xx^e siècle. La première révolution quantique, qui a bouleversé la physique au début du xx^e siècle, était basée sur la dualité onde/particule. Elle a permis de décrire avec précision le comportement statistique des milliards de milliards d'atomes qui composent la matière, des nuées d'électrons qui conduisent le courant électrique dans un métal ou un semi-conducteur, du nombre tout aussi impressionnant de photons qui constituent un faisceau lumineux. Elle a fourni les outils de

compréhension des propriétés mécaniques des solides, alors que la physique classique était incapable d'expliquer pourquoi la matière, constituée de charges positives et négatives qui s'attirent, ne s'effondre pas sur elle-même. Elle a aussi donné une description quantitative précise des propriétés électriques et optiques des matériaux, et offert le cadre conceptuel pour décrire des phénomènes aussi surprenants que la supraconductivité ou les propriétés étranges de certaines particules élémentaires. C'est encore dans le contexte de cette première révolution quantique que les physiciens ont inventé de nouveaux dispositifs – le transistor, le laser, les circuits intégrés – qui ont conduit à la société de l'information. Mais vers les années 1960, ils ont commencé à se poser deux nouvelles questions laissées de côté par la première révolution quantique : (1) Comment appliquer la physique quantique, dont les prévisions sont de nature statistique, à des objets microscopiques individuels ? (2) Les propriétés surprenantes des *paires d'objets quantiques intriqués*, décrites dans l'article EPR de 1935 mais jamais observées, correspondent-elles véritablement au comportement de la nature, ou se pourrait-il que l'on ait atteint une des limites de la mécanique quantique ? C'est la réponse à ces questions, d'abord donnée par les expérimentateurs, puis approfondie par les théoriciens, qui a lancé la nouvelle révolution quantique que nous sommes en train de vivre¹.

La question du comportement des objets quantiques individuels a été l'objet de controverses toujours animées, et parfois violentes, entre physiciens. Pendant longtemps, une majorité d'entre eux, et non des moindres, pensa que la question n'avait guère de sens, et en tout cas pas d'importance, car il n'était pas concevable d'observer un objet quantique individuel, et encore moins de le contrôler, de le manipuler. Citons par exemple Erwin Schrödinger : « [...] il faut dire que nous ne faisons pas plus d'*expériences* avec des particules uniques que nous ne pouvons élever des ichtyosaures dans un zoo². » Mais, à partir des années 1970, les expérimentateurs sont devenus capables d'observer, de manipuler et de contrôler des

1. Les notes sont regroupées en fin d'ouvrage, p. 151 et suivantes.

objets microscopiques individuels : électrons, atomes, ions. J'ai un souvenir toujours vif de l'enthousiasme des participants de la conférence internationale de physique atomique de Boston en 1980, lorsque Peter Toschek présenta la première photo d'un ion unique piégé, observable directement grâce aux photons de fluorescence qu'il réémettait lorsqu'il était éclairé par un laser. Ces avancées expérimentales ont permis d'observer directement les fameux sauts quantiques, mettant fin à des décennies de controverses. Elles ont aussi montré que le formalisme quantique est capable de décrire ces comportements individuels, à condition d'interpréter correctement les résultats probabilistes des calculs. Quant à la deuxième question, celle des propriétés de l'intrication, c'est d'abord sur des paires de photons qu'il a été possible de tester les calculs quantiques, dans une suite d'expériences toujours plus proches du schéma idéal dont avaient rêvé les théoriciens, à commencer par John Bell, et qui ont conclu à la validité des prédictions quantiques, quelque surprenantes qu'elles puissent être.

Ayant développé dans les années 1980 un groupe de physique appliquée travaillant sur les fibres optiques, et ayant par ailleurs toujours eu un intérêt personnel et une activité théorique sur les fondements de la mécanique quantique (de façon plus ou moins clandestine ou tout au moins discrète vis-à-vis de son employeur, à l'époque où poser ce type de questions n'était pas toujours bien considéré), Nicolas Gisin s'est tout naturellement trouvé parmi les premiers à tester l'intrication quantique sur des paires de photons injectés dans des fibres optiques. Sa connaissance des technologies des fibres optiques commerciales lui a permis, à la surprise générale il faut bien le dire, d'utiliser le réseau commercial de télécommunications par fibre optique déployé autour de Genève, et de montrer que l'intrication survit à des distances de plusieurs dizaines de kilomètres. Divers tests conceptuellement simples lui ont permis de souligner le caractère absolument stupéfiant de l'intrication entre événements éloignés, et de mettre en œuvre le fameux protocole de téléportation quantique. Connaissant sa double compétence de théoricien des fondements et d'expert des applications des fibres optiques, on ne sera pas non plus surpris de savoir qu'il a été parmi

les premiers à développer les applications de l'intrication comme la cryptographie quantique ou la production de nombres vraiment aléatoires.

Ce sont les deux talents de Nicolas Gisin que l'on retrouve dans ce livre passionnant, pari réussi de présenter des questions particulièrement subtiles de physique quantique dans un langage accessible au grand public non scientifique, et en évitant le recours au formalisme mathématique. Il nous dévoile ce que sont l'intrication, la non-localité quantique et le hasard quantique, dont il nous présente quelques applications. Mais ce livre est plus qu'un livre de vulgarisation, et les spécialistes de physique quantique y trouveront des discussions profondes sur ces phénomènes dont, comme l'écrit Nicolas Gisin, nous sommes loin d'avoir compris tous les enjeux, et encore moins toutes les conséquences. À la question de savoir si le rejet expérimental du réalisme local doit nous conduire à abandonner la notion de réalité physique ou celle de localité³, je réponds comme lui : autant le concept global de réalisme local était cohérent et intellectuellement satisfaisant, autant le découper en morceaux en gardant seulement l'une des deux notions l'est beaucoup moins. Comment définir la réalité physique autonome d'un système localisé dans l'espace-temps si ce système est affecté par ce qui se passe sur un autre système séparé par un intervalle du genre espace ? Ce livre nous propose une solution moins violente en montrant que si on prend en compte l'existence d'un hasard quantique fondamental, on peut rendre plus pacifique la coexistence entre une réalité physique non locale et la causalité relativiste chère à Einstein. Ainsi, même les physiciens qui connaissent ces questions trouveront dans le livre de Nicolas Gisin matière à progresser dans leur réflexion. Quant au public curieux qui y découvrira les mystères de l'intrication et de la non-localité quantique, il pourra d'emblée pénétrer au cœur du problème, et en apprendre toutes les subtilités expliquées de façon lumineuse par un des meilleurs spécialistes mondiaux de ces questions⁴.

Alain Aspect,
Palaiseau, mai 2012.

AVANT-PROPOS

Si vous aviez vécu à l'époque de la révolution newtonienne, auriez-vous voulu comprendre ce qui se passait ? Aujourd'hui la physique quantique nous donne l'occasion de vivre en direct une révolution conceptuelle d'ampleur similaire. Ce livre va vous aider à comprendre ce qui se passe. Sans mathématiques, mais aussi sans tenter de cacher les difficultés conceptuelles. En effet, si la physique a besoin des mathématiques pour explorer les conséquences de ses hypothèses et pour calculer précisément certaines de ses prédictions, les mathématiques ne sont pas nécessaires pour raconter la grande histoire de la physique. Car ce qui est intéressant en physique, ce ne sont pas les mathématiques, mais les concepts. Il ne s'agit pas ici de faire fonctionner les équations, mais de *comprendre*.

Certains passages de ce livre réclament du lecteur un véritable effort intellectuel. Chacun comprendra quelque chose et personne ne comprendra tout ! Dans ce domaine, la notion même de compréhension devient confuse. Toutefois, je fais le pari que tout le monde peut comprendre une partie de la révolution conceptuelle en cours et peut y prendre plaisir. Pour cela, il faut accepter que tout ne soit pas transparent, et ne pas partir du postulat, trop souvent entendu, que l'on « ne comprend rien à la physique »...

Si un passage vous paraît trop difficile, continuez votre lecture, la suite vous éclairera probablement. Ou parfois vous comprendrez qu'il s'agissait d'une subtilité glissée là pour mes collègues physiciens qui eux aussi ont droit à prendre plaisir à lire ce livre. Et si

nécessaire, revenez en arrière pour relire un passage ardu. Rappelez-vous : l'important n'est pas de tout comprendre, mais d'acquérir une vue globale. Vous verrez qu'en fin de compte on peut vraiment comprendre beaucoup de physique quantique sans aucun recours aux mathématiques !

La physique quantique est souvent l'objet d'interprétations verbeuses et de dissertations philosophiques approximatives. Afin d'éviter ces écueils, on n'utilise ici que le bon sens. Quand les physiciens font une expérience, ils interrogent une réalité extérieure. Les physiciens décident quelles questions poser et quand les poser. Et quand la réponse vient, par exemple sous la forme d'une ampoule rouge qui s'allume, ils ne se posent pas la question de savoir si la lumière est vraiment rouge ou s'il s'agit d'une illusion : la réponse est « rouge », un point c'est tout.

Le lecteur verra que certaines anecdotes sont reprises dans différents chapitres du livre : mon expérience d'enseignant m'a appris qu'il est souvent très favorable à la compréhension de répéter quelques points importants dans des contextes différents. Enfin, ce livre n'a aucune prétention historique. Les notes sur mes illustres prédécesseurs ne reflètent que mes propres réflexions, accumulées durant plus de trente années de ma vie de physicien professionnel.

INTRODUCTION

Depuis notre plus jeune âge, nous apprenons que pour interagir avec un objet qui est hors de notre portée, nous n'avons que le choix entre deux possibilités. Soit nous nous déplaçons jusqu'à lui, en rampant comme le font les bébés ; soit nous utilisons un objet, par exemple un bâton, pour allonger notre bras afin de l'atteindre. Plus tard, nous comprenons que des mécanismes plus complexes peuvent également être mis en œuvre : déposer une lettre dans une boîte aux lettres, par exemple. La lettre sera prélevée par un employé de la poste, triée à la main ou par une machine, expédiée par camion, train ou avion, puis acheminée vers son destinataire. Internet, la télévision et d'innombrables autres exemples quotidiens nous apprennent qu'en fin de compte toute interaction et toute communication entre deux objets éloignés se propagent continûment de proche en proche en suivant un mécanisme qui peut être complexe, mais qui suit toujours une trajectoire continue qu'on peut repérer, au moins en principe, dans l'espace et au cours du temps.

Cependant, la physique quantique, qui étudie le monde au-delà de ce qui nous est directement perceptible, affirme que des objets éloignés dans l'espace peuvent parfois former un tout. Ainsi, quelle que soit la distance qui les sépare, si l'on touche l'un des deux objets, tous les deux tressaillent ! Comment croire à une chose pareille ? Une telle affirmation est-elle testable ? Comment faut-il la comprendre ? Et peut-on utiliser cette drôle de physique quantique pour communiquer à distance à l'aide de ces objets-éloignés-qui-ne-for-

ment-qu'un-tout ? Ce sont les principales questions que nous allons aborder dans ce livre.

Je vais tenter de vous faire partager cette fascinante découverte d'un monde qui ne peut pas être décrit qu'avec des interactions se propageant de proche en proche, un monde où peuvent se produire des corrélations dites « non locales ». Nous rencontrerons les concepts de « vrai hasard », de corrélation, d'information et même de libre arbitre. Nous verrons aussi comment les physiciens produisent des corrélations non locales, comment ils les exploitent pour créer des clés inviolables de cryptographie, et comment ces merveilleuses corrélations permettent la « téléportation quantique ». Un autre objectif de ce livre est d'illustrer la démarche scientifique. Comment peut-on se convaincre que quelque chose de totalement contre-intuitif est vrai ? Quelle preuve faut-il pour changer de paradigme et accepter une révolution conceptuelle ? En prenant un peu de hauteur, nous verrons que l'histoire de la non-localité quantique est finalement assez simple et très humaine. Nous verrons enfin que la nature produit du hasard (du vrai hasard !) qui peut se manifester en plusieurs endroits forts éloignés les uns des autres sans se propager de proche en proche d'un endroit à l'autre. Nous verrons que le hasard permet aussi d'éviter que cette forme de non-localité puisse être utilisée pour communiquer, interdisant ainsi que soit enfreinte une des lois de la relativité, qui stipule qu'aucune communication ne peut excéder la vitesse de la lumière.

Nous vivons une époque extraordinaire : sous nos yeux, la physique découvre que notre intuition la plus profonde, à savoir que des objets ne peuvent pas « interagir » à distance, n'est pas correcte. J'ai mis des guillemets à « interagir », car il nous faudra préciser ce que cela veut effectivement dire. Le physicien explore le monde de la physique quantique, monde peuplé d'atomes, de photons et d'autres objets mystérieux à nos yeux. Passer à côté de cette révolution sans s'y intéresser serait aussi dommage que de passer à côté et d'ignorer la révolution darwinienne ou la révolution newtonienne si nous en avions été contemporains. En effet, la révolution conceptuelle en cours n'est pas moindre, elle bouleverse très profondément

l'image qu'on peut se faire de la nature et donnera lieu à toutes sortes de technologies qui nous sembleront magiques.

Au chapitre 2 nous entrerons dans le vif du sujet avec le concept de corrélation grâce à un jeu que nous appellerons le jeu de Bell, et qui démontre que certaines corrélations sont impossibles à réaliser en n'utilisant que des interactions se propageant de proche en proche. Ce chapitre est essentiel pour la suite, bien qu'il ne contienne pas de physique quantique. C'est probablement le plus difficile à bien comprendre, mais tout le reste du livre est là pour vous y aider...

Puis, nous nous demanderons comment réagir si quelqu'un gagne au jeu de Bell, fait apparemment impossible mais réalisable grâce à la physique quantique, avant d'affronter les concepts de vrai hasard (chapitre 3) et d'impossibilité de cloner un système quantique (chapitre 4). Les deux chapitres suivants, 5 et 6, introduisent cette drôle de physique quantique, d'abord avec le concept théorique d'intrication, puis avec les expériences et la conclusion qui s'impose : *la nature est non locale*.

Avant d'accepter cette conclusion, nous nous demanderons si elle est véritablement inévitable. Au chapitre 9, nous verrons toute l'imagination que les physiciens ont déployée pour essayer de revenir à une description locale de la nature. Cette aventure est encore « chaude », très actuelle et illustre ce que c'est que d'être « malin comme un physicien ». Nous continuerons notre histoire au chapitre 10 en décrivant certaines recherches passionnantes. Cela nous permettra d'entrer dans le monde de la recherche d'aujourd'hui.

À quoi ça sert ?

« À quoi ça sert ? » est la question qui m'est le plus souvent posée. Apparemment, il ne faudrait jamais rien faire qui n'a pas d'application immédiate. Je pourrais répondre : « À quoi ça sert d'aller au cinéma ? » Il est vrai que je suis payé pour faire ma recherche bien-aimée, alors qu'au cinéma c'est moi qui paye. Alors j'essaie de trouver une réponse plus politiquement correcte, mais,

franchement, la meilleure réponse est simplement que c'est fascinant ! Bien que je dirige un groupe de physique appliquée, je ne me lève pas chaque matin pour inventer un gadget à succès, mais parce que la physique me fascine ! Comprendre la nature, en particulier comment elle peut produire des corrélations non locales, est un objectif qui se suffit à lui-même. Mais alors, pourquoi est-ce que je travaille dans un groupe de physique appliquée ? Simple opportunisme ? Il y a une très bonne raison de s'intéresser aux applications, même et peut-être surtout si notre motivation profonde tourne autour des concepts : un concept réellement pertinent et nouveau a forcément des conséquences ; en particulier, il ouvre nécessairement de nouvelles perspectives pratiques. Plus le concept est révolutionnaire, plus les applications seront futuristes. L'avantage énorme de travailler sur des applications potentielles est d'avoir un outil pour tester les concepts. De plus, une fois une application identifiée, plus personne ne peut nier la pertinence du concept : comment nier la pertinence d'un concept sous-jacent à une application dans le monde réel ?

L'histoire de la non-localité quantique en est une excellente illustration. Jusqu'à la première application, l'intrication et la non-localité étaient largement ignorées, voire dénigrées comme purement philosophiques par la grande majorité des physiciens. Pour s'y intéresser avant 1991, il fallait du courage, sinon de la témérité¹. Quasiment aucun poste académique n'était attribué à cet axe de recherche, alors qu'aujourd'hui tout le monde s'y intéresse. Évidemment, la motivation des gouvernements qui financent ces centres de recherche penche plutôt du côté des technologies quantiques que des concepts sur lesquels elles reposent, mais l'important est que les étudiants de ces centres apprennent cette physique nouvelle.

Le chapitre 7 présente deux applications d'ores et déjà commerciales, la cryptographie quantique et les générateurs de nombres aléatoires d'origine quantique. Finalement, la téléportation quantique, l'application la plus surprenante, sera racontée au chapitre 8.

Chapitre 1

APÉRITIFS

Avant de présenter le concept central de ce livre, j'aimerais commencer, en guise d'apéritif, par deux petites histoires, l'une – réelle – s'est déroulée dans le passé, l'autre est encore de la fiction, mais pourrait bien se produire dans un avenir pas trop lointain.

Newton : une si grande absurdité...

Nous avons tous entendu parler de la théorie de la gravitation universelle de Newton, selon laquelle tous les objets s'attirent les uns les autres en fonction de leur masse et de la distance qui les sépare (plus précisément en fonction de l'inverse du carré de leur distance, mais pour ce livre cela n'est pas essentiel). Par exemple, le Soleil et la Terre sont liés par une force attractive qui équilibre la force centrifuge et maintient la Terre sur une orbite approximativement circulaire autour du Soleil. Il en va de même pour les autres planètes, pour le couple Terre-Lune et même pour notre galaxie qui tourne autour du centre d'un amas de galaxies. Concentrons-nous sur le couple Terre-Lune : comment la Lune fait-elle pour savoir qu'elle doit être attirée par la Terre en fonction de la masse de cette dernière et de la distance Terre-Lune ? Comment la Lune connaît-elle la masse de la Terre

et la distance qui la sépare de nous ? Utilise-t-elle, comme le bébé évoqué au début, une sorte de bâton ? Nous lance-t-elle des espèces de balles ? Communique-t-elle d'une façon ou d'une autre ? Cette question enfantine est très sérieuse. Elle intriguait déjà énormément le grand Newton pour qui l'hypothèse de la gravitation universelle, hypothèse qu'il a énoncée et qui a fait sa célébrité, était une absurdité à laquelle aucun esprit sain ne pouvait croire sérieusement ! (voir l'encadré 1). Mais, pour l'heure, il suffit de savoir que l'intuition de Newton était correcte, même s'il a fallu des siècles et tout le génie d'Einstein (qui « compléta » sa théorie de la gravitation) pour trouver la réponse. Aujourd'hui, les physiciens savent que l'action à distance qui est en jeu dans la gravitation, ou dans l'interaction entre deux charges électriques, n'est pas tout à fait instantanée : elle résulte de l'envoi de messagers, de sorte que l'hypothèse des « balles » évoquée plus haut est la bonne. Ces messagers sont des petites particules auxquelles les physiciens donnent des noms. Les messagers de la gravitation s'appellent des gravitons, ceux des forces électriques sont des photons.

Encadré 1 Newton¹

« That Gravity should be innate, inherent and essential to Matter, so that one Body may act upon another at a Distance thro' a Vacuum, without the mediation of any thing else, by and through which their Action and Force may be conveyed from one to another, is to me so great an Absurdity, that I believe no Man who has in philosophical Matters a competent Faculty of thinking, can ever fall into it. »

« Que la gravité soit innée, inhérente et essentielle à la matière, de sorte qu'un corps puisse agir sur un autre à distance, à travers le vide, sans la médiation de quelque autre chose pour transporter l'action et la force de l'un à l'autre, cela est pour moi une si grande absurdité qu'à mon avis aucun homme ayant une faculté de réfléchir avec compétence aux problèmes philosophiques ne peut y tomber. »

Ainsi, la physique, depuis Einstein, décrit la nature comme un ensemble d'objets localisés qui ne peuvent interagir que de proche en proche. Cette idée est conforme à notre intuition du monde, ainsi qu'à celle de Newton. Mais la physique d'aujourd'hui repose aussi sur un autre pilier théorique : la physique quantique, qui décrit le monde des atomes et des photons. Einstein a participé à cette découverte. En 1905, il a interprété l'effet photoélectrique comme dû à un bombardement de particules de lumière, les photons, qui éjectent des électrons de la surface d'un métal, en interagissant mécaniquement avec eux, de proche en proche, comme des boules de pétanque. Mais, dès que la physique quantique s'est développée et a été formalisée, Einstein s'en est éloigné car il a rapidement perçu que cette drôle de physique réintroduit une forme d'interaction à distance². Comme Newton trois siècles auparavant, Einstein a rejeté cette hypothèse qu'il jugeait absurde et qu'il a qualifiée d'action-fantôme à distance.

Aujourd'hui, la mécanique quantique est très bien établie au cœur de la physique. Elle contient effectivement une forme de non-localité qui n'aurait probablement pas plu à Einstein, même si elle diffère profondément de la non-localité de Newton. De plus, cette forme de non-localité quantique est très bien étayée expérimentalement ; on lui trouve même des applications prometteuses en cryptographie et elle permet un phénomène incroyable : la téléportation quantique.

Un drôle de « téléphone non local »

Voici une petite histoire de science-fiction pas aussi futuriste qu'elle en a l'air. En effet, la technologie permettra bientôt de vivre cette histoire.

Imaginons une connexion « téléphonique » entre deux partenaires que, par commodité, nous appellerons Alice et Bob, comme les deux premières lettres de l'alphabet. Comme il arrive parfois, la liaison est mauvaise, il y a du bruit. La liaison est même si mauvaise qu'Alice n'entend rien de ce que Bob essaye de lui dire ; tout

ce qu'elle entend est un bruit continu « chrzukscryprsrkrzypczykrt... ». De même, Bob n'entend que « chrzukscryprsrkrzypczykrt... ». Ils ont beau hurler dans leur combiné, le tapoter, se déplacer dans l'appartement autant que le fil du combiné le permet, rien n'y fait. Agaçant ! Impossible de communiquer avec un tel appareil qui manifestement ne mérite pas son nom de téléphone.

Mais Alice et Bob sont des physiciens : ils enregistrent une minute du bruit produit par leur appareil. Ainsi, Alice pourra montrer à Bob qu'il ne s'agissait pas de mauvaise volonté de sa part, et réciproquement. Surprise : le bruit enregistré par les deux amis s'avère être rigoureusement identique. Les deux enregistreurs utilisés étant numériques, Alice et Bob peuvent vérifier que chacun des bits de leurs enregistrements sont bien identiques. Incroyable... La source du bruit ne peut donc être que chez l'opérateur, ou quelque part le long de la ligne téléphonique. Comme le bruit est parfaitement synchronisé, ils en concluent que sa source doit être précisément au milieu de la ligne, de telle sorte qu'il arrive en même temps chez Alice et chez Bob.

Les deux amis décident alors de tester leur hypothèse, à savoir que la cause du bruit est un défaut, probablement d'origine électronique, au milieu de la ligne téléphonique qui les relie. Alice propose d'allonger sa ligne en ajoutant un long câble : son bruit devrait donc être légèrement retardé par rapport à celui de Bob. Mais rien n'y fait : non seulement le bruit est toujours là et toujours identique chez les deux correspondants, mais il est encore parfaitement synchrone. Bob propose alors de couper le fil du téléphone. Mais le bruit continue !

Comment expliquer un tel phénomène ? Le fil du combiné ne sert-il qu'à éviter de l'égarer dans l'appartement ? S'agit-il d'un téléphone sans fil attaché à un mur par simple commodité ? Ou le bruit est-il produit par les combinés eux-mêmes et non par une source située entre eux ? Serait-ce l'explosion d'une galaxie lointaine qui provoque le même bruit dans les deux récepteurs ? Comment tester ces hypothèses ? Bob, qui s'y connaît en ondes électromagnétiques, s'isole dans une cage de Faraday, un grillage métallique isolant des ondes radio, mais le bruit est toujours là. Alice propose

qu'ils s'éloignent très loin l'un de l'autre : ainsi, quel que soit le mécanisme grâce auquel les combinés communiquent, la qualité de la liaison devrait décroître et finalement disparaître. Mais, encore une fois, rien n'y fait.

Alice et Bob en concluent que leurs combinés ont enregistré une très longue séquence d'un bruit dont ils reproduisent une séquence chaque fois qu'on décroche, la séquence exacte étant choisie très précisément en fonction de l'heure. Ainsi, il n'est plus surprenant que les deux combinés produisent toujours le même bruit.

Tout fiers de leur démarche scientifique, Alice et Bob vont présenter leur trouvaille à leur professeur de physique qui les félicite. Mais le professeur ajoute : « L'hypothèse que vos téléphones produisent le même bruit grâce à une cause commune, un même bruit enregistré dans vos deux combinés, est une hypothèse qu'on peut tester ; on appelle cela un test de Bell. » Les tests de Bell, ou jeux de Bell, seront présentés au chapitre suivant. Pour l'instant, contentons-nous de dire qu'Alice et Bob se précipitent chez eux pour effectuer ce test de Bell sur leurs combinés et que le test échoue. Ils répètent l'expérience plusieurs fois, mais rien n'y fait. L'hypothèse d'une cause commune enregistrée dans les combinés est donc réfutée.

Alice et Bob se demandent alors quel mécanisme permet à leurs combinés de produire ce même bruit, à grande distance, sans communication et sans que celui-ci soit préenregistré dans les combinés. Ils ont beau se creuser les méninges, ils ne parviennent pas à imaginer le moindre mécanisme susceptible d'expliquer le phénomène. Ils retournent voir leur professeur : « Pas surprenant que vous ne trouviez pas de mécanisme, car il n'y en a aucun ; ce n'est pas de la mécanique, mais de la physique quantique : le bruit est produit au hasard, mais il s'agit du "vrai" hasard, chaque bit du bruit n'existant pas avant que les combinés ne le produisent dans un pur acte de création. De plus, ce hasard quantique est capable de se manifester en plusieurs endroits à la fois, dans vos deux combinés par exemple.

— Mais, s'écrie Alice, ce n'est pas possible, le signal doit décroître avec la distance entre les deux appareils, sinon cela implique qu'on pourrait communiquer à des distances arbitraires.

— En outre, ajoute Bob, la parfaite synchronisation impliquerait une vitesse de communication arbitrairement grande, voire plus grande que la vitesse de la lumière, ce qui est impossible. »

Le professeur reste imperturbable : « Vous m'avez raconté que le bruit reste inchangé même si vous hurlez dans votre téléphone, même si vous vous déplacez, tournez sur vous-même ou secouez l'appareil ; vous voyez bien que le fait qu'un même bruit soit produit au hasard des deux côtés ne permet pas de communiquer, votre interlocuteur n'apprend rien de ce que vous êtes en train de faire. » Et il conclut : « Il n'y a donc pas de conflit avec la relativité d'Einstein : vous vérifiez bien qu'aucune communication ne va plus vite que la lumière. »

Alice et Bob en restent bouche bée. En effet, leurs drôles de « téléphones » ne permettant pas de communiquer ne sont donc pas vraiment des téléphones, même s'ils en ont l'apparence. Mais comment peuvent-ils se coordonner pour toujours produire le même résultat sans aucune communication ni entente préalable ? Et que signifie cette histoire de « vrai » hasard capable de se manifester simultanément à plusieurs endroits différents ? Bob finit par lâcher : « Mais si c'est vraiment ainsi que cela se passe, on doit pouvoir utiliser le phénomène ; dans ce cas, je vais pouvoir construire quelque chose, puis jouer avec jusqu'à ce que je comprenne comment ça marche. Après tout, c'est ainsi que j'ai compris comment fonctionne l'électricité, comment tourne la trajectoire d'une balle liftée et – en fait – tout ce que j'ai jamais compris. »

Mais oui, conclut le professeur, cela sert à produire des nombres aléatoires, ainsi qu'à sécuriser des communications confidentielles, ce qu'on appelle la cryptographie quantique, et cela peut même servir à la téléportation quantique. Mais d'abord, il nous faut comprendre le concept central de ce livre : la non-localité, ce qui passe par le concept de corrélation et par celui de jeu de Bell.

Chapitre 2

CORRÉLATIONS LOCALES ET NON LOCALES

Le concept central de ce livre est celui de *corrélation non locale*. Nous verrons que ce concept est intimement lié à celui de vrai hasard, c'est-à-dire d'événements intrinsèquement imprévisibles. Le hasard est déjà en soit un phénomène fascinant, mais nous allons ici rencontrer un hasard non local. Ces notions sont nouvelles, surprenantes, voire révolutionnaires. Il n'est pas facile de se convaincre de leur pertinence, aussi ce chapitre est peut-être le plus difficile, mais la suite du livre est là pour vous aider. Pour se convaincre de l'existence de corrélations non locales et de vrai hasard, les physiciens ont inventé un jeu, le jeu de Bell. Les physiciens sont de grands enfants qui n'en finissent pas de démonter leurs jouets pour comprendre comment ils fonctionnent.

Avant d'introduire ce jeu, il nous faut rappeler ce qu'est une corrélation. La science consiste essentiellement à observer des corrélations, puis à inventer des explications de ces corrélations. John Bell a écrit que les corrélations exigent des explications (« *correlations cry out for explanations*¹ »). Après avoir présenté un exemple simple de corrélations, nous nous demanderons quels schémas explicatifs peuvent en rendre compte. Nous verrons qu'il n'y en a finalement que très peu ; si on se restreint à des schémas locaux, c'est-à-dire avec un mécanisme qui se propage continûment de proche en proche, il n'y a même que deux schémas explicatifs.

Le jeu de Bell nous permettra ensuite d'étudier des corrélations particulières. Ce jeu se joue à deux personnes qui doivent collaborer

pour obtenir ensemble un maximum de points. Les règles de ce jeu sont simples et il est facile à jouer. Par contre, on n'en comprend pas d'emblée le but, une sorte de calcul non local. En fait, l'intérêt n'est pas tellement le jeu lui-même, mais de comprendre comment il fonctionne. C'est ainsi que nous allons entrer dans le vif du sujet – les corrélations non locales et la révolution conceptuelle en cours.

Mais commençons par le commencement : le concept de corrélation.

Corrélations

Chaque jour, nous faisons des choix qui ont des conséquences. Certains choix et leurs conséquences sont plus importants que d'autres.

Certaines conséquences ne dépendent que de nos choix, mais beaucoup dépendent aussi de choix faits par d'autres. Dans ce cas, les conséquences de nos choix ne sont pas indépendantes les unes des autres : elles sont corrélées. Par exemple, le choix du menu du repas du soir dépend, entre autres, du prix des produits à l'épicerie du coin, prix décidés plus ou moins librement par d'autres. Les menus des habitants d'un même quartier sont ainsi corrélés : s'il y a une grosse promotion sur les épinards en branche, il est probable que ce plat sera fréquemment au menu. Une autre cause de corrélation entre les menus est l'influence du choix du voisin. S'il y a une queue devant un stand, nous pouvons être influencés et tentés d'aller voir ce qui semble si attrayant ou, au contraire, d'éviter cette queue. Dans les deux cas, il y aura corrélation – positive dans le premier cas, négative dans le second.

Poussons cet exemple à l'extrême. Imaginons deux voisins, que nous appellerons à nouveau Alice et Bob (nous verrons qu'ils jouent un rôle similaire à celui des étudiants de l'histoire du drôle de téléphone), qui partagent soir après soir toujours le même menu. Leurs menus du soir sont donc parfaitement corrélés. Comment expliquer cette corrélation ?

Une première possibilité est que Bob copie systématiquement sur Alice, et ne choisisse donc pas son menu, ou, inversement, qu'Alice copie sur Bob. Nous voici avec un premier schéma explicatif de corrélation : un premier événement influence un second événement. Ce schéma d'explication peut être testé, alors soyons scientifiques et testons-le. Par la pensée, éloignons Alice et Bob très loin l'un de l'autre, dans deux villes sur deux continents différents, chacun ayant à sa disposition une épicerie locale. Pour éviter qu'ils puissent s'influencer, exigeons d'Alice et Bob qu'ils fassent leurs courses exactement au même moment, et – encore mieux – imaginons-les carrément sur deux galaxies différentes. Dans ces conditions, impossible de communiquer, ni même de s'influencer de façon inconsciente comme le font les gens qui bâillent². Mais imaginons que la parfaite corrélation entre leurs menus du soir subsiste. Impossible d'expliquer une telle corrélation par une influence, il nous faut un autre schéma explicatif.

Une deuxième explication possible est que l'épicerie proche d'Alice et celle proche de Bob n'offrent en fait qu'un seul et même produit, qu'il n'y a donc pas de choix. Les deux épiceries auraient, il y a longtemps, établi une liste des menus du soir pour les années à venir. Les menus pourraient varier d'un soir à l'autre, mais chaque soir les deux épiceries respectent les instructions figurant sur leurs listes. La liste peut avoir été préparée par le gérant d'une chaîne d'épiceries et communiquées par e-mail à tous les membres de ce consortium galactique d'épiceries. Ainsi, Alice et Bob se retrouvent forcément avec le même menu, soir après soir. Selon cette explication, les menus d'Alice et Bob sont déterminés par une même cause qui a son origine dans un passé suffisamment lointain pour que cette cause puisse influencer aussi bien Alice que Bob, malgré la distance qui les sépare. Cette cause commune s'est propagée continûment dans l'espace, de proche en proche, sans saut ni rupture. On parle de « cause commune locale » : commune car cette cause provient d'un passé commun, et locale car tout se passe localement et continûment, de proche en proche.

Nous voici avec une explication logique. Réfléchissez bien : y a-t-il une autre explication possible ? Essayez de trouver un troisième schéma explicatif au fait qu'Alice et Bob se retrouvent chaque soir avec le même menu, une explication autre qu'une influence d'Alice sur Bob ou de Bob sur Alice, et autre qu'une cause commune locale. N'y a-t-il vraiment aucune autre explication possible ? Si surprenant que cela puisse paraître, les scientifiques n'ont jamais trouvé de troisième explication. Toutes les corrélations observées en science, hors physique quantique, s'expliquent soit par une influence d'un événement sur un autre (explication du 1^{er} type), soit par des causes communes locales, comme le gérant des deux épiceries (explication du 2^e type). Dans les deux types d'explications, l'influence ou les causes communes se propagent continûment de proche en proche : dans ce sens précis, toutes ces explications sont locales. Par extension, on parle de corrélations locales pour dire que ces corrélations ont une explication locale. En fait, nous verrons que la physique quantique fournit une troisième explication, qui est justement l'objet de ce livre. Mais hors de la physique quantique, il n'y a que deux types d'explications pour toutes les corrélations observées, que ce soit en géologie ou en médecine, en sociologie ou en biologie, etc. Et ces deux types d'explications sont locaux car basés sur une chaîne de mécanismes qui se propagent continûment de proche en proche.

C'est la recherche d'explications locales qui a fait le succès de la science. En effet, la science se caractérise par sa constante recherche de bonnes explications. Une explication est bonne si elle satisfait trois critères. Le plus connu de ces critères est la précision. Cela se traduit par des équations mathématiques qui permettent de faire des prédictions qui peuvent être comparées aux observations et aux expériences. Toutefois, je pense que ce critère, bien qu'essentiel, n'est pas le plus important. Une deuxième caractéristique d'une bonne explication est de raconter une histoire. Tous les cours de science commencent par une histoire. Sinon, comment introduire de nouveaux concepts, tels que ceux d'énergie, de molécule, de couche géologique ou de corrélation ?

Jusqu'à l'avènement de la physique quantique, toutes les histoires se déroulaient continûment dans l'espace au cours du temps, donc localement. Finalement, le troisième critère d'une bonne explication est qu'elle ne peut pas facilement être modifiée. Ainsi, une bonne explication peut être testée par des expériences car elle ne peut pas être facilement modifiée pour s'adapter à de nouvelles données expérimentales qui la contredisent (elle peut être falsifiée, dirait Popper).

Revenons à Alice et Bob et à la parfaite corrélation entre leurs menus du soir. La distance élimine toute tentative d'explication par influence directe (type 1). Comment pourrions-nous tester une explication par cause commune locale (type 2) ? Dans notre exemple, Alice n'a aucun choix : il n'y a qu'une seule épicerie proche de chez elle et cette épicerie n'offre, chaque soir, qu'un seul menu. Cette situation sans choix est trop simple pour pouvoir être testée, il nous fait donc élaborer un peu notre exemple.

Imaginons qu'il y ait deux épiceries proches de chez Alice, l'une à gauche en sortant de chez elle, l'autre à droite. De même, il y a deux épiceries proches de chez Bob, à nouveau l'une sur sa gauche, l'autre à droite. Ainsi, chaque soir, Alice et Bob peuvent librement choisir de faire leurs courses à l'épicerie de gauche ou de droite. Alice et Bob habitent toujours sur deux galaxies différentes et ne peuvent donc pas s'influencer. Mais imaginons qu'à chaque fois que, par chance, ils choisissent tous deux de faire leurs courses à l'épicerie de gauche, ils se retrouvent toujours avec le même menu. La seule explication locale à cette corrélation est que les épiceries de gauche partagent une liste qui, soir après soir, détermine l'unique menu du soir. Pour les épiceries de gauche la situation est identique à celle rencontrée précédemment. Mais l'existence de plusieurs épiceries proches d'Alice et de Bob permet d'imaginer davantage de corrélations. Par exemple, si Alice choisit l'épicerie à sa gauche, mais Bob celle à sa droite, on peut à nouveau imaginer qu'ils se retrouvent toujours avec le même menu. De même si Alice va à l'épicerie de droite et Bob à celle de gauche. On en conclut que la seule explication locale de ces trois corrélations, gauche-gauche, gauche-droite et droite-gauche, est à

nouveau que ces quatre épiceries partagent la même liste de menus. Mais imaginons de plus que, lorsque Alice et Bob utilisent tous deux l'épicerie sur leur droite, ils ne se retrouvent jamais avec le même menu. Est-ce possible ? Hum, cela a l'air impossible, n'est-ce pas ?

Nous voici tout près de l'esprit du jeu de Bell. Laissons là les épiceries. Empruntons la démarche scientifique et simplifions autant que possible la situation. Au lieu de menu du soir, nous parlerons de résultat. Et puisqu'il suffit de ne considérer que deux résultats possibles, nous n'en considérerons pas davantage.

Le jeu de Bell

Le fabricant du jeu de Bell fournit deux boîtes apparemment identiques (figure 1). Chacune est munie d'une manette et d'un écran. La manette au repos est en position verticale. Elle peut être poussée soit vers la gauche, soit vers la droite. Une seconde après une poussée de la manette d'un côté ou de l'autre, un résultat s'affiche sur l'écran de la boîte. Les résultats sont binaires, c'est-à-dire qu'il n'y a que deux résultats possibles : soit 0 (zéro), soit 1 (un) ; les informaticiens disent que les résultats sont des bits d'information. Pour chaque boîte les résultats semblent aléatoires.

Pour jouer, Alice et Bob prennent chacun une boîte, règlent leurs montres, puis s'éloignent l'un de l'autre. Dès 9 heures du matin, toutes les minutes, chacun pousse sa manette vers la gauche ou vers la droite, puis note consciencieusement le résultat produit par sa boîte, ainsi que l'heure et le sens de sa poussée. Il est important qu'ils choisissent la gauche ou la droite chaque minute librement et indépendamment. En particulier, il leur est interdit de toujours faire le même choix, ni de se mettre d'accord à l'avance sur les choix à faire. L'important est qu'Alice ne connaisse pas les choix de Bob et que Bob ne connaisse pas ceux d'Alice. Il faut noter qu'Alice et Bob n'essayent pas de tricher, leur réel but étant de comprendre comment fonctionnent les boîtes du jeu de Bell.

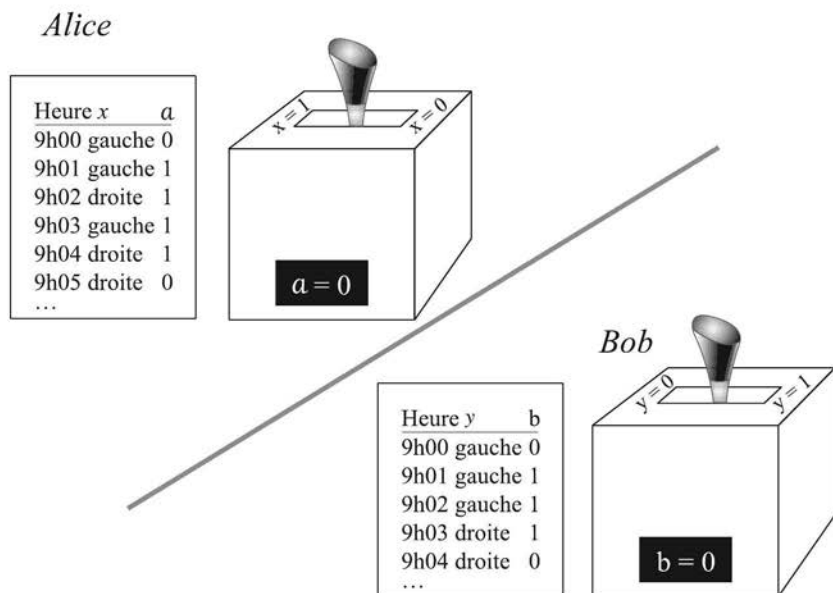


Figure 1. Alice et Bob jouent au jeu de Bell. Chacun est devant une boîte munie d'une manette. Chaque minute, ils choisissent de pousser leur manette soit vers la gauche, soit vers la droite, puis chaque boîte affiche un résultat. Alice et Bob notent consciencieusement l'heure, leurs choix et les résultats produits par leurs boîtes. En fin de journée, ils comparent leurs résultats et déterminent s'ils ont gagné ou non au jeu de Bell. Leur but est de comprendre comment fonctionnent les boîtes du jeu de Bell, tout comme les enfants apprennent en essayant de comprendre comment fonctionnent leurs jouets.

Ils jouent ainsi jusqu'à 19 heures, accumulant 600 données, donc environ 150 cas de poussées « gauche-gauche » et approximativement autant de « gauche-droite », « droite-gauche » et « droite-droite ». Puis, en fin de journée, ils se retrouvent pour calculer les points et leur score selon les règles suivantes :

1. Chaque fois qu'Alice a poussé sa manette vers la gauche, ou que Bob a poussé sa manette vers la gauche, ou que tous les deux ont poussé leurs manettes vers la gauche, ils reçoivent un point *si les résultats sont identiques*.

2. En revanche, chaque fois qu'Alice et Bob ont tous deux choisi de pousser leurs manettes vers la droite, ils reçoivent un point *si les résultats diffèrent*.

- Le score est calculé ainsi : pour les quatre combinaisons de choix « gauche-gauche », « gauche-droite », « droite-gauche » et « droite-droite » ils calculent d'abord le taux de succès (le nombre de points divisé par le nombre total d'essais), puis additionnent ces quatre taux de succès. Ainsi, le score maximum est de 4 puisqu'il y a quatre combinaisons de choix et chaque taux de succès est au maximum de 1. Pour un score S , nous dirons qu'Alice et Bob gagnent S fois sur 4 au jeu de Bell. Le score, étant une moyenne, peut être un nombre quelconque. Par exemple, un score de 3,41 signifie qu'Alice et Bob gagnent en moyenne 3,41 fois sur 4 ou 341 fois sur 400.

- Nous verrons qu'il est facile de construire des boîtes permettant à Alice et Bob d'obtenir un score de 3. Aussi, nous écrirons parfois qu'ils gagnent au jeu de Bell pour dire qu'ils gagnent au jeu de Bell plus souvent que 3 fois sur 4.

Pour se familiariser un peu avec ce drôle de jeu de Bell, commençons par étudier le cas où Alice et Bob ne notent pas les résultats produits par leurs boîtes, mais notent ce qui leur passe par la tête (bref : ils produisent des résultats au hasard, indépendamment l'un de l'autre, chacun de son côté³). Dans ce cas, les taux de succès seront tous de $1/2$. En effet, la moitié du temps Alice et Bob notent le même résultat et l'autre moitié des résultats différents, quels que soient les choix d'Alice et Bob. Donc le score du jeu de Bell est de $4 \times 1/2 = 2$. Donc, pour dépasser un score de 2, les boîtes d'Alice et Bob ne peuvent pas être indépendantes l'une de l'autre, mais doivent être coordonnées de manière à produire des résultats corrélés.

Toujours pour se familiariser avec ce jeu, considérons un deuxième exemple, où les deux boîtes produisent toujours le même résultat 0, quelle que soit la position de la manette. Dans ce cas, les choix d'Alice et Bob n'ont aucune influence. On vérifie aisément que les taux de succès sont de 1 pour les trois choix « gauche-

gauche », « gauche-droite » et « droite-gauche », et de 0 pour le choix « droite-droite ». Donc le score est $S = 3$.

Avant d'analyser comment ces boîtes fonctionnent, faisons encore un petit effort d'abstraction. Cela nous permettra d'entrer au cœur de la non-localité.

Calcul non local : $a + b = x \cdot y$

Les scientifiques aiment bien coder les objets qu'ils analysent à l'aide de nombres, comme ici les choix et les résultats. Cela leur permet de se concentrer sur l'essentiel sans être perturbés par de longues phrases du type « Alice a poussé sa manette vers la gauche et a observé le résultat 0 ». Cela leur permet de faire des additions et multiplications ; nous verrons que cela est utile pour résumer par une équation toute simple le cœur de la non-localité.

Concentrons-nous d'abord sur Alice. Notons son choix par la lettre x et son résultat par la lettre a . Ainsi, $x = 0$ signifie qu'Alice a choisi de pousser sa manette vers la gauche et $x = 1$, vers la droite. De même, notons par la lettre y le choix de Bob et par b son résultat. Avec ces notations, le petit tableau ci-dessous résume les cas où, selon les règles du jeu de Bell, Alice et Bob reçoivent un point :

	$x = 0$	$x = 1$
$y = 0$	$a = b$	$a = b$
$y = 1$	$a = b$	$a \neq b$

Faisons un petit peu d'arithmétique élémentaire, pour le plaisir. Le jeu de Bell, avec Alice et Bob chacun devant sa boîte, à grande distance pour éviter la copie, chacun faisant ses choix libres et notant ses résultats, peut se résumer en une belle équation :

$$a + b = x \cdot y$$

(lire : a plus b égale x fois y).

En effet, le produit $x \cdot y$ vaut toujours 0 sauf si $x = y = 1$. L'équation nous dit donc que $a + b = 0$ sauf si $x = y = 1$. Considérons d'abord le cas $x = y = 1$; dans ce cas, $a + b = 1$, et comme a et b valent 0 ou 1, l'équation $a + b = 1$ n'a que 2 solutions : soit $a = 0$ et $b = 1$, soit $a = 1$ et $b = 0$. Donc, si $a + b = 1$, on a nécessairement $a \neq b$ et, selon les règles du jeu de Bell, Alice et Bob reçoivent un point.

Considérons maintenant les trois autres cas : $(x, y) = (0, 0)$ ou $(0, 1)$ ou $(1, 0)$. On a toujours $x \cdot y = 0$, et l'équation se simplifie en $a + b = 0$. Une première solution possible est $a = b = 0$. La deuxième solution est $a = b = 1$. Mais comment cela, $1 + 1$ n'est-il pas égal à 2 ? Non ! Quand on calcule avec des 0 et des 1 (des bits), le résultat doit aussi être un 0 ou un 1. Ici, $2 = 0$ (les mathématiciens disent qu'on calcule modulo 2). Donc, l'équation $a + b = 0$ est équivalente à $a = b$.

En résumé, la belle équation $a + b = x \cdot y$ résume parfaitement le jeu de Bell. Chaque fois qu'elle est satisfaite, Alice et Bob reçoivent un point. Vous voyez qu'il est possible de montrer la révolution quantique avec des mathématiques simples⁴.

Cette équation traduit le phénomène de non-localité. Pour gagner systématiquement au jeu de Bell, il faut que les boîtes calculent le produit $x \cdot y$. Mais si le choix x n'est connu que de la boîte d'Alice et le choix y que de la boîte de Bob, alors il est impossible d'effectuer ce calcul localement. Au mieux, on peut parier sur $x \cdot y = 0$ et on aura raison 3 fois sur 4, donc on peut obtenir un score de 3. Mais un score supérieur à 3 requiert un calcul « non local » de $x \cdot y$, car les termes du produit $x \cdot y$ n'existent chacun qu'en des lieux éloignés l'un de l'autre.

Stratégies locales pour le jeu de Bell

Alice et Bob sont chacun devant leur boîte, faisant chaque minute leurs choix librement et indépendamment, et notant consciencieusement leurs choix et les résultats qu'ils observent. Que peuvent bien faire ces boîtes pour permettre à Alice et Bob d'obtenir un bon score ?

Imaginons d'emblée qu'elles sont trop éloignées pour s'influencer. Pour ce faire, éloignons par la pensée Alice et Bob, si loin l'un de l'autre qu'aucune communication ne soit possible. Séparons par exemple Alice et Bob d'une distance telle que même la lumière mette plus d'une seconde pour aller de l'un à l'autre (plus de 300 000 kilomètres, approximativement la distance Terre-Lune). Dans ce cas extrême, il n'est plus possible qu'Alice (ou plus précisément sa boîte) communique son choix à Bob (à la boîte de Bob). Aucune explication en termes de communication ou d'influence n'étant possible, il nous en faut une autre.

Commençons par analyser le cas où, par coïncidence, les deux manettes sont poussées vers la gauche. Dans ce cas, Alice et Bob n'obtiennent un point que si leurs résultats sont identiques. C'est la même situation que celle des clients des épiceries qui se retrouvent toujours avec le même menu s'ils choisissent l'épicerie de gauche. Nous avons déjà vu que, si on exclut toute influence directe, cela n'est possible que si ces deux épiceries ne proposent aucun choix et imposent le même menu. Dans le cas des boîtes du jeu de Bell, cela signifie que si les manettes sont poussées à gauche, elles produisent toutes deux le même résultat. Ce résultat est prédéterminé à chaque minute, mais peut changer d'une minute à l'autre, tout comme les menus uniques peuvent varier d'un soir à l'autre. On tient là une explication d'une corrélation maximale pour le cas où les deux manettes ont été poussées vers la gauche. C'est une explication du deuxième type, une explication due à une cause commune locale. En effet, les résultats prédéterminés à chaque minute étaient enregistrés dans chaque boîte, c'est-à-dire localement.

Poursuivons encore un moment l'analyse de ce cas. Les résultats enregistrés à l'origine dans les boîtes peuvent être le résultat d'une longue série de pile ou face. Du point de vue d'Alice, les résultats ont donc toutes les apparences du hasard. Et il en est de même pour Bob. Par contre, quand ils se retrouvent et observent qu'ils ont toujours obtenu le même résultat, ils ne croiront plus qu'il s'agisse de hasard... à moins qu'il ne s'agisse d'un hasard non local ? Nous y reviendrons.

Encadré 2

Au hasard

Un résultat au hasard est un résultat imprévu. Mais imprévu pour qui ? Bien des choses sont imprévues, soit parce qu'elles sont le résultat de processus trop complexes pour être appréhendés, soit parce qu'on n'a pas prêté attention à toutes sortes de détails qui ont influencé le résultat. En revanche, un résultat au « vrai » hasard est imprévu car *intrinsèquement* imprévisible : un tel résultat n'est pas déterminé par une ou plusieurs chaînes causales, si complexes soient-elles. Un résultat au vrai hasard n'est pas prévisible car, avant de se manifester, il n'existait pas du tout : il n'était pas nécessaire, sa réalisation est un acte de pure création.

Pour illustrer ce concept, imaginons qu'Alice et Bob se rencontrent par hasard au coin de la rue. Cela peut se produire, par exemple, parce que Alice se rendait au restaurant un peu plus loin et Bob chez son ami qui habite la rue d'à côté. À partir du moment où ils ont entrepris d'aller à pied, par le chemin le plus court, au restaurant pour Alice et chez son ami pour Bob, la rencontre était prévisible. C'est un exemple de deux chaînes causales, les cheminements d'Alice et Bob, qui se croisent et produisent ainsi un hasard du point de vue de chacune des deux personnes. Mais la rencontre était prévisible pour quelqu'un qui aurait une vue globale. L'apparent hasard n'est donc que le fruit d'une ignorance : Bob ignorait le cheminement d'Alice et réciproquement. Mais qu'en était-il avant qu'Alice ne décide de se rendre au restaurant ? Si on admet qu'elle jouit de libre arbitre, alors avant qu'elle ne se décide, la rencontre était proprement imprévisible. Le vrai hasard est similaire.

Le vrai hasard n'a donc pas une cause au même sens qu'en physique classique. Un résultat au vrai hasard n'est pas prédéterminé, de quelque manière que ce soit. Il faut néanmoins nuancer cette affirmation, le vrai hasard pouvant avoir une cause. Mais cette dernière ne détermine pas le résultat, elle détermine seulement la probabilité des divers résultats possibles. Seule la propension que tel ou tel résultat se réalise est prédéterminée.

Selon le schéma explicatif des causes communes locales, à chaque minute chaque boîte produit un résultat prédéterminé. Pour ce type d'explication, la liste des résultats est préétablie et mémorisée par chaque boîte : chaque boîte contient donc une sorte de petit ordinateur avec une grosse mémoire, une horloge et un programme qui chaque minute lit la donnée suivante de la mémoire.

Suivant le programme, le résultat peut être indépendant de la position de la manette ou peut en dépendre. Mais quels programmes agissent dans les boîtes d'Alice et de Bob ? N'y a-t-il pas une infinité, ou au moins un grand nombre de programmes possibles ? En fait non, car la démarche scientifique de simplification avec des choix et des résultats binaires limite le nombre de programmes possibles à seulement 4 par boîte : le programme ne doit fournir qu'un résultat parmi 2 possibles pour chacun des 2 choix possibles. Ces 4 programmes⁵ possibles, chez Alice, sont les suivants :

- #1. le résultat est toujours $a = 0$, quel que soit le choix de x .
- #2. le résultat est toujours $a = 1$, quel que soit le choix de x .
- #3. le résultat est identique au choix : $a = x$.
- #4. le résultat est l'opposé du choix : $a = 1 - x$.

De même, il y a 4 programmes possibles chez Bob. Donc, au total, il y a $4 \times 4 = 16$ combinaisons de programmes chez Alice et Bob. Bien sûr, les programmes peuvent changer d'une minute à l'autre, aussi bien chez Alice que chez Bob, mais à chaque minute l'un des 4 programmes chez Alice détermine son résultat a et l'un des 4 programmes chez Bob détermine b .

Étudions ces 16 combinaisons possibles de programmes et calculons les scores correspondants. Rappelez-vous que le but est de

trouver le score maximal possible ayant une explication locale. Nous verrons qu'il est impossible de fabriquer des boîtes utilisant des stratégies locales permettant d'obtenir un score supérieur à 3. À ce point, vous avez le choix, soit de me croire sur parole et passez directement p. 42 (« Gagner au jeu de Bell : corrélations non locales »), soit de vous convaincre par vous-même en faisant l'effort de suivre le petit raisonnement du paragraphe suivant (ce à quoi je vous encourage vivement).

Commençons par la combinaison des programmes #1 chez Alice et #1 chez Bob ; dans ce cas, les deux résultats sont toujours 0 : $a = b = 0$, et Alice et Bob gagnent au jeu de Bell 3 fois sur 4. En effet, ils n'échouent au jeu de Bell que quand ils font tous deux le choix 1. Étudions une deuxième combinaison de programme : #1 chez Alice, donc $a = 0$, et #3 chez Bob, donc $b = y$. Considérons successivement les 4 paires de choix possibles. Pour $x = 0$ et $y = 0$ les résultats sont $(0,0)$ et donc Alice et Bob « gagnent », c'est-à-dire obtiennent un point. Pour $x = 0$ et $y = 1$, les résultats sont $(0,1)$ et ils « perdent », c'est-à-dire n'obtiennent aucun point. Pour $x = 1$ et $y = 0$, les résultats sont $(0,0)$ et ils gagnent. Finalement, pour $x = 1$ et $y = 1$, les résultats sont $(0,1)$ et ils gagnent à nouveau (rappelons-nous que pour $x = y = 1$ le but est que les résultats diffèrent). En résumé, Alice et Bob réalisent à nouveau un score de 3. Voilà, vous pouvez maintenant terminer le raisonnement par vous-même, considérez successivement les 14 combinaisons de programmes restantes (ou référez-vous à la table 1).

Table 1

Pro- gramme chez Alice	Pro- gramme chez Bob	Résultats pour choix (x,y) = (0,0)	Résultats pour choix (x,y) = (0,1)	Résultats pour choix (x,y) = (1,0)	Résultats pour choix (x,y) = (1,1)	Score
#1	#1	a=0 b=0	a=0 b=0	a=0 b=0	a=0 b=0	3
#1	#2	a=0 b=1	a=0 b=1	a=0 b=1	a=0 b=1	1
#1	#3	a=0 b=0	a=0 b=1	a=0 b=0	a=0 b=1	3
#1	#4	a=0 b=1	a=0 b=0	a=0 b=1	a=0 b=0	1
#2	#1	a=1 b=0	a=1 b=0	a=1 b=0	a=1 b=0	1
#2	#2	a=1 b=1	a=1 b=1	a=1 b=1	a=1 b=1	3
#2	#3	a=1 b=0	a=1 b=1	a=1 b=0	a=1 b=1	1
#2	#4	a=1 b=1	a=1 b=0	a=1 b=1	a=1 b=0	3
#3	#1	a=0 b=0	a=0 b=0	a=1 b=0	a=1 b=0	3
#3	#2	a=0 b=1	a=0 b=1	a=1 b=1	a=1 b=1	1
#3	#3	a=0 b=0	a=0 b=1	a=1 b=0	a=1 b=1	1
#3	#4	a=0 b=1	a=0 b=0	a=1 b=1	a=1 b=0	3
#4	#1	a=1 b=0	a=1 b=0	a=0 b=0	a=0 b=0	1
#4	#2	a=1 b=1	a=1 b=1	a=0 b=1	a=0 b=1	3
#4	#3	a=1 b=0	a=1 b=1	a=0 b=0	a=0 b=1	3
#4	#4	a=1 b=1	a=1 b=0	a=0 b=1	a=0 b=0	1

En résumé, quelle que soit la stratégie locale du fabricant des boîtes, donc quelle que soit la combinaison de programmes, Alice et Bob ne peuvent jamais gagner au jeu de Bell plus souvent que 3 fois sur 4.

Les physiciens aiment bien énoncer ce résultat sous la forme d'une inégalité. C'est l'inégalité de Bell⁶. Comme cette inégalité est centrale pour toute la thématique de ce livre, je l'écris en entier. À

défait d'en apprécier d'emblée la signification, il est possible d'en apprécier la beauté, tout comme certains d'entre nous apprécient la beauté d'une partition musicale :

$$P(a = b|0,0) + P(a = b|0,1) + P(a = b|1,0) + P(a \neq b|1,1) \leq 3$$

Ici $P(a = b|x,y)$ se lit comme suit : probabilité que a soit égal à b dans le cas des choix x et y . De même, $P(a \neq b|1,1)$ se lit comme la probabilité que a soit différent de b dans le cas $x = y = 1$. L'inégalité de Bell énonce ce que nous avons trouvé : la somme des 4 probabilités dans le jeu de Bell, donc le score, est au maximum de 3.

Donc, pour des corrélations locales, l'inégalité de Bell est toujours satisfaite.

Encadré 3 Inégalité de Bell

D'une façon très générale, la probabilité $P(a,b|x,y)$ peut résulter d'un mélange statistique de différentes situations possibles. Par exemple, une première situation possible traditionnellement dénotée λ_1 peut se présenter avec une probabilité $\rho(\lambda_1)$, une deuxième, λ_2 , avec une probabilité $\rho(\lambda_2)$, etc. Ces probabilités $\rho(\lambda)$ permettent d'analyser aussi des cas où l'on ne connaît pas exactement la situation réelle. En fait, on n'a même pas besoin de connaître les probabilités de ces situations, il suffit de savoir que différentes situations se présentent avec diverses probabilités.

Ces situations λ peuvent inclure l'état quantique, habituellement dénoté ψ ; en fait ces λ peuvent inclure tous les passés d'Alice et de Bob, voire même l'état de tout l'univers, sauf que les choix x et y doivent être indépendants de λ . Mais les λ peuvent aussi être beaucoup plus limités, comme les choix des stratégies d'Alice et Bob dans le jeu de Bell. Historiquement, ces λ étaient appelés « variables cachées locales », mais il est préférable de les considérer comme l'état physique des systèmes (des boîtes d'Alice et Bob) tels que décrits par n'importe quelle théorie présente ou future ; ainsi, les inégalités de Bell nous disent quelque chose sur la structure de toute future théorie physique compatible avec les expériences d'aujourd'hui. Bref, la seule hypothèse sur les λ est qu'ils ne contiennent aucune information sur les choix x et y .

Pour chaque situation λ , la probabilité conditionnelle peut toujours s'écrire comme

$P(a, b|x, y, \lambda) = P(a|x, y, \lambda) \cdot P(b|x, y, a, \lambda)$. L'hypothèse de localité s'écrit alors que pour tout λ , ce qui se passe chez Alice ne dépend pas de ce qui se passe chez Bob, $P(a|x, y, \lambda) = P(a|x, \lambda)$, et réciproquement $P(b|x, y, a, \lambda) = P(b|y, \lambda)$. En résumé, l'hypothèse sous-jacente à toutes les inégalités de Bell s'obtient en moyennant sur les possibles situations λ :

$$P(a, b|x, y) = \sum_{\lambda} \rho(\lambda) P(a|x, \lambda) \cdot P(b|y, \lambda)$$

où $\rho(\lambda)$ dénote la probabilité que la situation λ se présente.

Jusqu'ici, nous avons supposé que les boîtes d'Alice et de Bob contiennent chacune un programme qui détermine les résultats en fonction des choix x et y . (Les informaticiens appellent x et y les données des programmes). Que se passerait-il si ces programmes ne déterminaient pas entièrement les résultats, mais laissaient une place au hasard ? On pourrait par exemple imaginer que la boîte d'Alice, de temps en temps, choisit au hasard d'utiliser le programme #1 ou le programme #3. Ou encore que la boîte produit de temps à autre un résultat au hasard. Est-ce que cela peut aider à gagner au jeu de Bell ? Remarquons d'abord que produire un résultat au hasard est identique à choisir au hasard entre le programme #1 (qui détermine $a = 0$) et le programme #2 (qui détermine $a = 1$). En fait, cela n'est pas utile et ne change pas grand-chose. Le jeu de Bell implique une longue durée et le calcul d'une moyenne. Si la boîte d'Alice, pour une minute donnée, choisit au hasard un programme parmi un ensemble de programmes, le score ne sera pas différent de celui obtenu si cette boîte utilise à chaque minute un programme précis choisi au hasard parmi cet ensemble de programmes. Supposer que les boîtes utilisent à chaque minute un programme précis n'est donc pas une hypothèse restrictive. Ajouter des stratégies aléatoires chez Alice et chez Bob n'aide pas à gagner au jeu de Bell. En fait, c'est même le contraire. Comme on l'a vu, si les boîtes d'Alice et de Bob produisent indépendamment des résultats au hasard, elles ne réalisent qu'un score de 2.

En résumé, aucune stratégie locale ne permet de gagner au jeu de Bell plus souvent que 3 fois sur 4. Les physiciens disent qu'« aucune corrélation locale ne peut violer l'inégalité de Bell ». En clair, si Alice et Bob parviennent néanmoins à gagner plus de 3 fois sur 4 au jeu de Bell, il n'y aurait aucune explication locale à ce phénomène. Comme nous l'avons vu, il n'existe que deux types d'explications locales, celles basées sur des influences qui se propagent de proche en proche (type 1) et celles basées sur des causes communes se propageant également de proche en proche depuis un passé commun (type 2). Or les explications de type 1 sont exclues par la grande distance qui sépare Alice et Bob et, comme nous venons de le voir, celles du type 2 ne permettent jamais de gagner au jeu de Bell plus souvent que 3 fois sur 4.

Gagner au jeu de Bell : corrélations non locales

Imaginons maintenant qu'Alice et Bob jouent longuement au jeu de Bell et gagnent en moyenne bien plus souvent que 3 fois sur 4. C'est ce que permet la physique quantique grâce à l'intrication. Mais laissons cette physique et cette fascinante intrication de côté pour le moment et considérons simplement l'hypothèse qu'Alice et Bob gagnent très souvent au jeu de Bell. Nous avons exclu l'hypothèse qu'ils s'influencent – ou que leurs boîtes communiquent –, même à l'aide d'onde de nature inconnue (nous reviendrons plus tard sur cette importante hypothèse). Nous venons de voir que si les boîtes produisent localement le résultat en fonction de l'heure et de la position de la manette (donc du choix de l'opérateur), alors le jeu ne peut pas être gagné plus souvent que 3 fois sur 4. Bref, gagner plus souvent que 3 fois sur 4 est impossible si on n'utilise que des stratégies locales, c'est-à-dire si on n'utilise que des mécanismes qui se propagent de proche en proche.

C'est pourquoi on appelle « non locales » des corrélations qui permettent de gagner au jeu de Bell plus souvent que 3 fois sur 4.

Mais alors, comment font Alice et Bob et leurs boîtes ? !

Si nous posons la question à un physicien d'avant la physique quantique, disons d'avant 1925, la réponse serait très simple : c'est rigoureusement impossible ! Pour gagner au jeu de Bell plus souvent que 3 fois sur 4, Alice et Bob, ou leurs boîtes, doivent tricher, communiquer d'une manière ou d'une autre ou s'influencer de façon peut-être inconsciente comme on peut faire bâiller quelqu'un en bâillant soi-même. Mais sans communication, c'est tout simplement impossible, dirait notre scientifique préquantique.

Et vous ? Voyez-vous comment gagner au jeu de Bell plus souvent que 3 fois sur 4 ? Croyez-vous que cela soit possible ? Je suis désolé de vous fatiguer les neurones avec ce jeu de Bell, mais nous sommes là au cœur de la non-localité. Nous sommes un peu comme ces personnes du Moyen Âge à qui l'on racontait que la Terre était ronde comme une boule et que des gens vivaient aussi de l'autre côté. Mais comment faisaient-ils pour ne pas tomber ? Aujourd'hui, chacun sait que les objets, et les gens, ne tombent pas du haut vers le bas, mais qu'ils tombent vers le centre de la Terre. Donc les gens de l'autre côté de la Terre sont maintenus au sol comme nos aimants sont maintenus sur le frigo. Grâce aux aimants, chacun comprend que nous sommes attirés par la Terre, et donc que ni les Australiens ni les Européens n'en tombent. Mais pour le jeu de Bell, quel est l'analogie de l'aimant sur le frigo ? Quelle histoire raconter pour comprendre ? Je ne peux hélas vous expliquer de façon intuitive comment l'intrication quantique permet de gagner au jeu de Bell plus souvent que 3 fois sur 4, mais je vous invite à poursuivre notre exploration du monde des atomes et des photons, et à jouer avec ce drôle de jeu, à imaginer ce qu'on pourrait en faire d'amusant, voire même d'utile. Voyons ce que cela peut signifier pour notre vision de l'univers. Décortiquons ensemble ces corrélations, un peu comme un enfant démonte ses jouets pour en découvrir les mécanismes cachés.

Encadré 4
John Bell :
« I am a quantum engineer, but on Sundays
I have principles. »

J'ai eu la chance de rencontrer souvent John Bell. Voici l'histoire d'une de mes toutes premières rencontres.

« Je suis un ingénieur quantique, mais le dimanche, j'ai des principes », c'est ainsi que John Bell commence un colloque clandestin bien particulier en mars 1983. Des mots que je n'oublierai jamais ! John Bell, le célèbre John Bell se présentait comme un ingénieur, une de ces personnes qui sait faire fonctionner les choses sans savoir pourquoi elles fonctionnent, alors que pour moi, tout fier de mon récent doctorat en physique théorique, John Bell était un géant parmi les théoriciens.

En 1983, l'Association vaudoise des chercheurs en physique organise sa semaine de formation continue annuelle, mélangeant chercheurs et enseignants. Une semaine à Montana, moitié ski, moitié cours donnés par de grands scientifiques. Cette année-là, le sujet était les fondements de la physique quantique. Ce sera pour moi l'occasion de faire la connaissance d'Alain Aspect, le premier homme⁷ à avoir gagné au jeu de Bell, et de partager avec lui de formidables après-midi de ski.

Pour des raisons propres à cette communauté, John Bell était invité, ce qui était une évidence, mais sans figurer dans le programme, c'est-à-dire sans plage horaire pour un cours, ce qui était une aberration. Avec un ami doctorant, nous avons invité John Bell à nous donner une présentation hors programme. Il a d'abord refusé, arguant qu'il n'avait pas ses transparents avec lui. Finalement, le colloque clandestin de John Bell aura lieu un soir, après le dîner, dans une cave hâtivement transformée en salle de cours, les étudiants étant assis par terre. L'« ingénieur à principes » nous expliqua qu'on peut utiliser la physique de façon pragmatique pour développer des applications, réaliser des expériences difficiles ou amusantes, trouver des règles empiriques qui fonctionnent bien en pratique, mais qu'il ne faut pas perdre de vue la grande entreprise de la science : expliquer et raconter la nature de façon consistante. Le message de John Bell me hante encore aujourd'hui.

Gagner au jeu de Bell ne permet pas de communiquer

Supposons qu'Alice et Bob gagnent au jeu de Bell plus souvent que 3 fois sur 4, peut-être même à tous les coups. Est-ce que cela leur permettrait de communiquer⁸ ? Notez que comme ils sont éloignés l'un de l'autre d'une distance arbitrairement grande, la possibilité de communiquer impliquerait une communication à une vitesse arbitrairement grande.

Comment Alice pourrait-elle communiquer une information à Bob ? Sa seule possibilité est d'actionner sa manette. Par exemple, à gauche pour signifier « oui » et à droite pour « non ». Mais, du point de vue de Bob, sa boîte produit des résultats au hasard. Quelle que soit la position de sa manette, les deux résultats possibles, $b = 0$ et $b = 1$, se produisent aussi fréquemment l'un que l'autre. Et cela reste vrai quelle que soit la position de la manette d'Alice. Il n'y a donc pas moyen d'utiliser les corrélations du jeu de Bell pour qu'Alice envoie un message à Bob, ou inversement. Ce n'est qu'en comparant les résultats des deux boîtes qu'on peut remarquer qu'ils sont corrélés. Rappelez-vous le drôle de « téléphone » du chapitre 1.

Encadré 5

Une communication sans transmission est impossible

Si une personne, appelons-la Alice, désire communiquer un message à une autre personne, Bob, elle doit tout d'abord inscrire son message sur un support physique. Le message est ensuite porté de proche en proche par ce support physique – lettre, électrons ou photons. Bob, enfin, réceptionne ce support physique et lit (décode) le message qu'il porte. Ainsi, le message est transmis de proche en proche d'Alice à Bob. Toute autre façon de communiquer un message serait non physique. Par exemple, si Alice pouvait choisir un message et l'inscrire sur un support physique, mais que rien ne parte d'elle, qu'aucun objet physique ne sorte de l'endroit où elle se trouve, alors elle ne pourrait pas communiquer son message. Sinon, comme

Newton l'avait déjà compris (encadré 1, p. 20), ce serait une communication sans transmission, or il est impossible de communiquer sans que quelque chose de physique (matière, onde, énergie) parte d'Alice, après qu'elle a choisi le message à communiquer.

Cette impossibilité relève du simple bon sens. Violer ce principe, par télépathie par exemple, permettrait de communiquer à une vitesse arbitraire. En effet, puisque rien ne transporterait le message, la distance séparant Alice et Bob n'aurait aucune importance et en allongeant arbitrairement cette distance on aurait une vitesse de communication arbitrairement grande, éventuellement supérieure à celle de la lumière. Mais cette impossibilité est encore plus fondamentale que la relativité, qui interdit toute vitesse supérieure à celle de la lumière : une communication non physique est impossible.

Il n'est donc pas possible d'utiliser les deux boîtes pour communiquer entre Alice et Bob⁹. Ce n'est qu'une fois qu'Alice et Bob ont pu comparer leurs résultats, donc après qu'ils se sont retrouvés en fin de journée et ont arrêté de jouer, qu'ils peuvent savoir s'ils ont gagné ou non au jeu de Bell. Il n'y a donc pas de connexion reliant Alice et Bob qui leur permette de communiquer. Communiquer uniquement grâce au jeu de Bell serait une communication sans qu'aucun objet porte le message de l'émetteur au récepteur : ce serait une communication sans transmission, bref une communication impossible (voir l'encadré 5).

Mais y a-t-il un lien, un « fil invisible » qui relie les deux boîtes non pour communiquer, mais simplement pour permettre aux boîtes de gagner au jeu de Bell ? Si un tel lien existait, on comprendrait le « truc ». Ce serait peut-être décevant : un simple truc de magicien. Mais, pour le physicien, ce pourrait être le début d'une découverte importante : découvrir de quoi est fait ce lien, comment il fonctionne, à quelle vitesse il transmet des influences cachées entre les boîtes, etc. Contentons-nous pour l'instant d'observer (par la pensée) qu'aucun lien visible n'est perceptible. Et rappelons-nous que nos deux boîtes sont tellement éloignées l'une de l'autre qu'aucune influence se propageant à la vitesse de la lumière ne parviendrait à destination à temps. De plus, Alice et Bob n'ont pas besoin de savoir où se trouve leur partenaire. Ils peuvent prendre leur boîte sous le bras et partir vers un lieu inconnu.

Ouvrons les boîtes

Quand en 1964 John Bell a présenté son jeu, qu'il appelait *the inequality*, ce n'était qu'une expérience de pensée, mais, depuis, ce jeu a été concrétisé dans de nombreux laboratoires. Ouvrons donc enfin ces boîtes d'apparence magique, puisqu'elles permettent de gagner au jeu de Bell.

En les ouvrant, on découvre tout un appareillage de physique : des lasers (des rouges, des verts et même certains produisant une belle lumière jaune), un cryostat (une sorte de réfrigérateur qui permet de refroidir des objets jusqu'au voisinage du zéro absolu, à environ -270 degrés Celsius), des interféromètres en fibre optique (sortes de circuits optiques pour photons), deux détecteurs de photons (des détecteurs de particules de lumière) et une horloge, (figure 2). Tout cela ne nous aide guère.

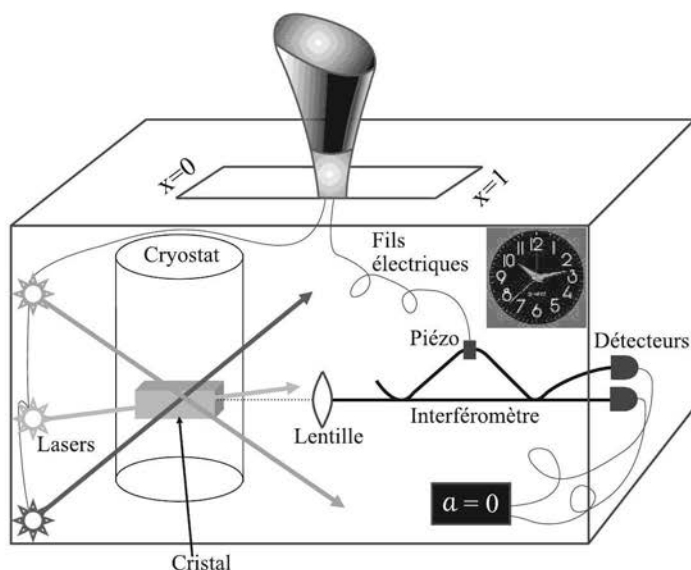


Figure 2. À l'intérieur des boîtes du jeu de Bell, Alice et Bob découvrent tout un appareillage compliqué de physicien. Mais ce n'est pas en regardant localement dans chacune des boîtes qu'Alice et Bob comprendront comment fonctionne le jeu de Bell, car ce jeu permet de produire des corrélations qui n'ont aucune explication locale.

En décortiquant l'appareillage, on découvre qu'au centre du cryostat, à l'intersection de tous les faisceaux lasers, se trouve un petit cristal de quelques millimètres, ressemblant à un petit morceau de verre. Et il semble bien que ce cristal-de-rien-du-tout soit le cœur de l'appareillage. En effet, quand la manette est poussée vers la gauche ou vers la droite cela déclenche une série d'impulsions laser qui illuminent le cristal et activent un élément piézoélectrique¹⁰ dans l'interféromètre connecté au cristal. Cet élément piézoélectrique bouge un tout petit peu dans la même direction que la manette. Puis l'un des deux détecteurs de photons se déclenche, après quoi la boîte produit un 0 ou un 1. On comprend bien que la manette produit quelque chose dans le cristal, grâce aux impulsions laser, puis détermine *via* l'élément piézoélectrique l'état de l'interféromètre. Finalement, le résultat est donné par le détecteur. Les deux boîtes sont rigoureusement identiques. À nouveau, le secret semble être contenu dans le petit cristal au centre de l'appareillage.

L'examen des boîtes n'est au fond guère concluant. Et tel est bien le message de ce chapitre : ce n'est pas en étudiant, même en détail, la construction et le fonctionnement des boîtes qu'on trouvera une explication. De toute façon, nous savons déjà qu'il n'y a pas d'explication locale à un gain au jeu de Bell, donc ce n'est certainement pas en regardant localement dans chacune des deux boîtes qu'on trouvera une explication ! Prenons un peu de hauteur. En fin de compte, tout cet appareillage compliqué ne fait rien d'autre que produire un résultat binaire chaque fois qu'on pousse la manette à gauche ou à droite. Donc, même si le mécanisme est très compliqué, il semble que cela ne peut rien faire d'autre que réaliser l'un des quatre programmes décrit plus haut (p. 37). Qu'est-ce que cela pourrait faire d'autre ? Encore une fois, il n'y a que deux positions possibles pour la manette et qu'un seul résultat binaire. Utiliser plusieurs lasers, un cryostat et des détecteurs de photons pour réaliser un tel programme paraît bien excessif ! Mais cet appareillage fait plus, puisqu'il permet de gagner au jeu de Bell. Un physicien préquantique aurait pu étudier ces appareillages longtemps sans rien comprendre, et donc nos lecteurs n'ont pas à rougir s'ils ne voient pas à quoi peuvent bien servir tous ces appareils. Le

chapitre 6 donnera la solution ; pour l'instant, il suffit de se rappeler que les cœurs de ces boîtes sont les cristaux, et que ces cristaux sont « intriqués¹¹ ». Mais qu'est-ce que c'est que ça ? Pour l'instant l'intrication est juste un mot afin de nommer le concept de la physique quantique qui permet de gagner au jeu de Bell. Patience.

En résumé, le contenu exact des boîtes n'importe pas. La seule chose importante à retenir est que les physiciens savent – en principe – comment construire des boîtes qui permettent à Alice et Bob de gagner au jeu de Bell plus souvent que 3 fois sur 4, et que l'ingrédient essentiel porte un nom : *l'intrication*. Le simple fait qu'il soit possible de gagner au jeu de Bell est une conclusion majeure, un fait presque aussi aveuglant qu'une photo de la Terre flottant dans l'espace : la Terre est ronde, et la physique quantique prédit des corrélations non locales.

Chapitre 3

NON-LOCALITÉ ET VRAI HASARD

Nous avons vu qu'il est facile d'obtenir un score de 3 au jeu de Bell. Par exemple, il suffit de se mettre d'accord à l'avance et de toujours produire le même résultat. Mais nous avons aussi vu qu'il est impossible de définir une stratégie locale qu'Alice et Bob appliquent chacun de son côté qui permette de gagner plus souvent que 3 fois sur 4. C'est la conclusion principale du chapitre 2.

Et si deux personnes gagnaient au jeu de Bell, c'est-à-dire obtenaient un score supérieur à 3 ? Que faudrait-il en conclure ?

La première conclusion qui semble s'imposer est double : soit ils s'influencent d'une façon subtile, soit ils trichent habilement. Admettons qu'on puisse écarter ces deux options. La deuxième conclusion possible est qu'il y a une erreur dans l'argument présenté au chapitre 2. Beaucoup de physiciens et philosophes ont passé des années là-dessus ; essayez vous aussi un moment. En effet, on ne doit jamais accepter un argument d'autorité ; chacun peut, et doit, vérifier par lui-même les raisonnements scientifiques. C'est d'autant plus recommandé ici que le raisonnement qui permet de conclure qu'il est impossible de gagner au jeu de Bell sans communiquer est simple et limpide. Encore une fois, chacun des deux partenaires, Alice et Bob, n'a le choix qu'entre quatre stratégies possibles. Il n'y a donc que $4 \times 4 = 16$ combinaisons de stratégies possibles et aucune ne permet de gagner plus souvent que 3 fois sur 4 (table 1 du chapitre 2). Refaites encore une fois le raisonnement, expliquez-le à votre partenaire et à un ami.

Vous pouvez être bien convaincu de la solidité de ce raisonnement, il est parfaitement solide et confirmé par des milliers de physiciens, philosophes, mathématiciens et spécialistes en informatique et théorie de l'information.

Mais alors, pourquoi se poser la question de joueurs gagnant plus souvent que 3 fois sur 4, puisque cela semble impossible ? Telle est en effet la bonne question. Le raisonnement est tellement simple, que, sans la physique quantique, personne ne s'y intéresserait : ce ne serait qu'une évidence de plus parmi les montagnes d'évidences inintéressantes, car non pertinentes. La seule bonne raison de s'intéresser à cette question est que la physique d'aujourd'hui permet de gagner à ce jeu et cela sans que les joueurs ne communiquent ni ne trichent.

Un tout non local

Revenons donc à notre question : que conclure d'un score systématiquement supérieur à 3 au jeu de Bell ? La seule possibilité est que les boîtes d'Alice et Bob, bien que séparées dans l'espace, ne soient pas séparées logiquement : malgré la distance qui les sépare, on ne peut pas décrire la boîte d'Alice d'un côté et celle de Bob de l'autre. En d'autres termes, on ne peut pas raconter ce que fait la boîte d'Alice de son côté et ce que fait celle de Bob de son côté. C'est comme si les deux boîtes, malgré la distance qui les sépare, agissaient comme un seul tout, un tout impossible à séparer logiquement en deux parties, bref un tout non local.

Un tout non local ! Est-ce que cela vous aide à comprendre ? Probablement pas (ou alors vous êtes vraiment génial !). « Non local » signifie ici tout simplement « qui ne peut être décrit comme deux parties indépendantes et bien localisées ». Bien sûr, Alice et Bob ainsi que leurs boîtes sont bien localisés, comme des personnes et des boîtes normales – on peut les entourer de murailles de béton armé et d'enceintes de plomb ou de tout ce que vous voulez, mais il est impossible de décrire leurs comportements comme étant tel et tel pour la boîte d'Alice et tel et tel pour la boîte de Bob. En

effet, si chacune avait un comportement, donc une stratégie, à elle, il leur serait impossible de gagner au jeu de Bell. Et ce, même si ces comportements et stratégies ont été discutés et coordonnés avant que les boîtes ne soient séparées dans l'espace.

Nous voici devant une conclusion tout à fait remarquable et très difficile à avaler. Si Alice et Bob réalisent un score supérieur à 3, alors nous sommes forcés d'admettre que malgré la distance qui les sépare et la possibilité d'identifier les deux joueurs, les résultats de leurs jeux ne peuvent pas être produits localement, l'un par la boîte d'Alice et l'autre par celle de Bob : *ces résultats sont produits d'une façon non locale*. C'est comme si la boîte d'Alice « savait » ce que fait celle de Bob et réciproquement.

Encadré 6 **Un calcul non local...**

Gagner au jeu de Bell signifie que les résultats d'Alice et Bob « s'attirent » de sorte à satisfaire l'équation $a + b = x \cdot y$ plus souvent que 3 fois sur 4. Donc, le produit $x \cdot y$ est estimé correctement plus souvent que localement possible, bien que les données x et y n'existent nulle part conjointement : x n'est connu que d'Alice et de sa boîte, y que de Bob et de sa boîte. On voit poindre l'idée d'un calculateur formidable : l'ordinateur quantique (même si l'histoire de cet ordinateur est encore longue et dépasse de loin cet ouvrage ; d'ailleurs on devrait plutôt parler de processeur quantique que d'un véritable ordinateur à tout faire).

Télépathie et vrais jumeaux

Certains penseront ici à la télépathie ou à des jumeaux qui, séparés, prennent les mêmes décisions ou souffrent des mêmes maux. En fait, ces images sont trompeuses.

Commençons par les jumeaux. Ce qui caractérise des jumeaux est qu'ils partagent le même ensemble de gènes : ils portent les mêmes instructions génétiques et seront par conséquent semblables,

souvent même remarquablement semblables. C'est comme pour des Alice et Bob locaux qui, eux aussi, « portent » des stratégies qui ressemblent à des instructions génétiques. Mais, précisément, nous avons vu que quelles que soient les stratégies « portées » par Alice et Bob ou mémorisées par leurs boîtes, jamais ils ne pourront gagner au jeu de Bell. Ainsi, de même, deux jumeaux parfaitement identiques et qui auraient, par hypothèse, subi exactement les mêmes influences environnementales tout au long de leur vie, ne pourraient pas non plus gagner au jeu de Bell. Donc, l'analogie des jumeaux est excellente pour comprendre les corrélations locales, mais elle ne permet pas du tout de comprendre comment on pourrait gagner au jeu de Bell. Bien au contraire, même des jumeaux idéaux ne peuvent pas gagner au jeu de Bell¹.

Venons-en à la télépathie. Si elle existait, elle permettrait à deux personnes de communiquer à distance par la pensée. La grande différence avec le jeu de Bell est que, pour gagner à ce jeu, nul n'est besoin de communiquer, il suffit que les résultats soient produits au hasard, mais d'une façon coordonnée : les boîtes d'Alice et Bob doivent en quelque sorte « savoir » ce que fait l'autre, mais les joueurs eux-mêmes ne peuvent pas utiliser ce « savoir » pour se transmettre de l'information. Donc, pour gagner au jeu de Bell, les joueurs ne pratiquent pas la télépathie, même si l'on peut s'imaginer que les boîtes, elles, sont télépathes.

Personnellement je n'aime pas trop penser que des boîtes sont capables de télépathie, parce que je ne vois pas ce que cela apporte à la compréhension ; j'ai l'impression de simplement changer un terme (non local) par un autre (télépathie). Mais si cette terminologie vous aide, pourquoi pas, pour autant que vous vous rappelez bien que ce ne sont pas les personnages qui peuvent faire de la télépathie, seulement les boîtes ou les cristaux qui se trouvent au cœur de ces boîtes. De surcroît, cette terminologie est trompeuse car en télépathie, il y a un émetteur et un récepteur. Nous verrons plus loin que cette hypothèse n'est guère possible. De plus, dans le jeu de Bell et dans les expériences, la symétrie entre Alice et Bob est parfaite : rien ne distingue un éventuel émetteur d'un récepteur.

Coordonner n'est pas communiquer

L'idée d'un tout non local fait immédiatement penser à une communication instantanée. Rappelez-vous la réaction de Newton à propos de la non-localité de sa théorie de la gravitation universelle. En effet, si les deux boîtes d'Alice et Bob gagnent au jeu de Bell, c'est qu'elles se coordonnent après que leurs manettes ont été poussées vers la gauche ou vers la droite. Mais puisqu'elles sont séparées par une grande distance, ces boîtes doivent être capables de se coordonner à distance. C'est ce qu'Einstein a appelé une « action fantôme à distance », terminologie qui souligne bien à quel point le grand savant n'y croyait pas. Mais voilà, aujourd'hui, de nombreuses expériences ont contredit l'intuition d'Einstein et confirmé la théorie quantique : la nature est bel et bien capable de « coordonner deux boîtes à distance ».

Coordonner ne signifie pas communiquer. Mais comment pourrait-on se coordonner sans communiquer ? Nous, êtres humains, en sommes incapables et avons donc la plus grande difficulté à imaginer comment cela pourrait se passer. Nous allons voir que pour se coordonner sans communiquer il faut que les boîtes produisent des résultats au hasard. Pour cela, nous commencerons par supposer le contraire, à savoir que les boîtes produisent des résultats prédéterminés ; nous verrons que cela permettrait à Alice et Bob de communiquer sans transmission. Comme de telles communications sans transmission sont impossibles (voir encadré 5, p. 45), on en conclut que les boîtes qui permettent de gagner au jeu de Bell ne peuvent pas produire des résultats prédéterminés.

Afin de mieux cerner la question, commençons par imaginer le cas simple suivant : la boîte d'Alice produit toujours $a = 0$ et Bob choisit $y = 1$. Si Bob obtient le résultat $b = 0$, il sait que $a = b$ et peut en déduire qu'Alice a probablement choisi $x = 0$. Dans l'autre cas, s'il obtient $b = 1$, il sait que $a \neq b$ et peut en déduire qu'Alice a probablement choisi $x = 1$. En effet, ce n'est qu'ainsi qu'ils obtiennent un point au jeu de Bell. L'encadré 7 ci-dessous montre que cette importante conclusion est vraie quelle que soit la relation qui détermine le résultat d'Alice en fonction de son choix.

Du paragraphe précédent, il faut retenir que si la boîte d'Alice produit le résultat a de façon déterministe et que Bob connaît cette façon de procéder, alors Bob peut déduire du résultat de sa boîte le choix d'Alice. Donc, dans cette hypothèse, Bob pourrait lire à distance les pensées d'Alice. En effet, chaque fois qu'ils obtiennent un point, Bob devine correctement le choix d'Alice. S'ils gagnent au jeu de Bell, cette sorte de communication serait fréquente.

Cette communication serait pratiquement instantanée car le temps de transmission est indépendant de la distance qui sépare Alice et Bob. En particulier, la vitesse de cette communication pourrait être plus grande que la vitesse de la lumière, mais la vitesse de la lumière n'a rien à faire dans cet argument : en éloignant Alice et Bob, on pourrait dépasser n'importe quelle vitesse. Plus important encore, on aurait là une communication non physique, puisque aucune transmission entre la boîte d'Alice et celle de Bob ne porterait la communication. Une telle communication sans transmission est impossible (voir l'encadré 5, p. 45).

En conclusion, si les boîtes d'Alice et Bob sont capables de se coordonner à distance, mais de telle sorte que cela ne puisse pas être utilisé par Alice et Bob pour communiquer, alors le résultat d'Alice ne peut pas être produit d'une façon déterministe. Il doit nécessairement être produit au hasard, grâce à un hasard non local.

Encadré 7

Le déterminisme impliquerait une communication sans transmission

Selon le déterminisme, il existerait une relation qui détermine le résultat produit par chaque boîte en fonction du sens de poussée de la manette. Or n'importe quelle relation déterministe entre le sens de poussée de la manette d'Alice et son résultat permettrait à Bob de lire à distance les choix d'Alice et donc d'effectuer une communication sans transmission. Comme une telle communication est impossible, le déterminisme est impossible. Pour nous en convaincre, étudions un deuxième exemple.

Imaginons que si la manette d'Alice est poussée « vers la gauche », alors sa boîte produit le résultat $a = 0$ et si elle est poussée « vers la droite », alors le résultat est $a = 1$ (cette stratégie correspond à la stratégie #3 vue au chapitre 2 : $a = x$). Dans ce cas, si Bob pousse sa manette vers la gauche (donc $y = 0$), il peut déduire du résultat produit par sa boîte le sens dans lequel Alice a poussé sa manette. En effet, si, par exemple, son résultat est $b = 0$, alors Bob sait qu'Alice a probablement poussé sa manette vers la gauche, car ce n'est qu'ainsi qu'ils obtiennent un point au jeu de Bell. En effet, pour $y = 0$ on doit avoir $a = b$, comme Bob observe $b = 0$ il en déduit $a = 0$, mais ce résultat n'est possible dans notre exemple que si $x = 0$, donc si Alice a poussé sa manette vers la gauche.

Pour se convaincre que cette conclusion est valide quelle que soit la relation qui détermine le résultat a en fonction du choix x , il suffit de remarquer que des quatre variables de l'équation $a + b = x \cdot y$ Bob en connaît deux, son choix y et son résultat b . Si, de plus, il connaît la relation $a = \text{fonction}(x)$, alors Bob peut calculer le choix x d'Alice (par exemple, si $a = x$, alors $a + b = x \cdot y$ devient $x + b = x \cdot y$, d'où, si Bob choisit $y = 0$, $x = b$: le résultat produit par la boîte de Bob est égale au choix x d'Alice).

La relation qui détermine le résultat d'Alice en fonction du sens de poussée de sa manette pourrait changer de minute en minute, mais à chaque minute cette relation serait fixe, préétablie longtemps à l'avance. Si tel était le cas, rien ne pourrait empêcher Bob de connaître cette relation pour chaque minute. Or, pour chaque relation, Bob peut deviner avec une bonne probabilité le sens dans lequel Alice pousse sa manette, donc Bob pourrait comme lire à distance les pensées d'Alice : on aurait une communication sans transmission.

Un hasard non local

Nous venons de comprendre que les résultats chez Alice et Bob sont produits au hasard, mais ces hasards ne sont pas indépendants : *le même hasard se manifeste chez Alice et chez Bob*. Voilà qui est fascinant ! Le hasard en soi est déjà un concept fascinant, mais ici, en plus, le même hasard se manifeste en deux endroits distants. Cette explication heurte frontalement notre bon sens, mais elle est inévitable. Si vous avez de la peine à avaler cette explication,

Rassurez-vous : de très nombreux physiciens ont également de la difficulté, dont Albert Einstein, qui n'a jamais cru à la possibilité de gagner au jeu de Bell.

Nous allons donc nous attacher à décrire ce « hasard non local » (chapitre 5) et à expliquer les expériences qui permettent de gagner au jeu de Bell (chapitre 6). Nous analyserons aussi la pertinence de ces expériences : n'y aurait-il pas une faille qui permettrait de sauver la localité (chapitre 9) ?

Avant de terminer ce chapitre, revenons cependant sur notre « explication ». J'ai écrit ce mot entre guillemets, car nous arrivons à un point où il faut se poser la question de ce qu'est une explication. Une explication est essentiellement une histoire qui raconte le phénomène à expliquer. Néanmoins, certains peuvent s'écrier avec quelque raison que parler de « hasard non local » n'est pas une explication. La conclusion est pourtant inévitable : il n'y a aucune histoire à raconter qui se déroule dans l'espace (localement) et au cours du temps (continûment), permettant de dire comment gagner au jeu de Bell.

Rappelez-vous les contemporains de Newton qui devaient avaler l'« explication » qu'on tombe vers le centre de la Terre. Est-ce une explication ? Oui et non. L'explication de la gravitation a l'immense avantage de se dérouler au cours de notre temps (on tombe) et dans notre espace (vers la Terre), mais elle laisse ouverte la question de savoir comment notre corps « sait » où est la Terre, même quand on a les yeux fermés.

L'explication du « hasard non local » est peut-être moins satisfaisante que celle de la chute libre. Le point principal est qu'il n'existe aucune explication basée uniquement sur des entités localisées. Gagner au jeu de Bell revient donc à démontrer que la *nature n'est pas locale*.

Faut-il alors renoncer à toute explication ? Certes non : nous devons accepter de raconter une histoire qui inclut des éléments non locaux, tel par exemple un hasard non local, un « vrai hasard » capable de se manifester en plusieurs endroits forts éloignés les uns des autres sans se propager de proche en proche d'un endroit à l'autre². La non-localité nous force à élargir la boîte à outils

conceptuels dans laquelle nous puisons pour raconter comment fonctionne la nature.

Pour vous aider, imaginez une sorte de dé non local, un « dé » qui peut être lancé par la poussée d'une des deux manettes, peu importe laquelle. Ce « dé non local » produit le résultat a chez Alice dès qu'elle a poussé sa manette dans la direction x et un résultat b chez Bob dès qu'il a poussé sa manette dans la direction y ; a et b sont aléatoires, mais avec la promesse qu'ils « s'attirent » de telle sorte à souvent satisfaire au but du jeu de Bell (à souvent satisfaire à l'équation $a + b = x \cdot y$).

Dès qu'on admet que le monde n'est pas déterministe, donc qu'un vrai hasard existe, on doit également admettre, d'une part que ce vrai hasard n'est pas nécessairement gouverné par les mêmes lois que celles qui régissent les probabilités classiques³, et d'autre part que rien *a priori* n'interdit à un vrai hasard de se manifester en plusieurs endroits du moment que cela ne permet pas de communiquer.

Un « vrai » hasard

Nous venons de voir qu'il n'y a qu'une possibilité pour éviter que le gain au jeu de Bell ne conduise à la possibilité de communication à des vitesses arbitrairement grandes : la boîte d'Alice ne produit pas les résultats en fonction de relations prédéterminées à chaque minute, mais produit ses résultats au hasard, au « vrai » hasard. Il n'y a que l'hypothèse d'un vrai hasard qui empêche Bob de connaître la relation entre le choix d'Alice et son résultat. Si ce n'était pas du vrai hasard, Bob – et les physiciens – finirait bien par trouver cette relation.

Il nous faut donc définitivement renoncer à l'idée que la boîte d'Alice produit localement un résultat. Ce sont les deux boîtes qui produisent globalement une paire de résultats, même si du point de vue de chacun des deux partenaires, son propre résultat est dû au hasard.

La notion de vrai hasard mérite qu'on s'y attarde. L'exemple typique du hasard est le jeu de pile ou face, ou encore le jet d'un dé. Dans ces deux cas, la complexité des microphénomènes en jeu – choc de molécules de l'air sur la pièce de monnaie, rugosité de la surface sur laquelle rebondit le dé, etc. – est telle qu'il est impossible en pratique de prédire le résultat. Mais cette impossibilité n'est pas intrinsèque, elle n'est que le résultat de nombreuses petites causes qui s'imbriquent pour produire le résultat. Si l'on suivait avec suffisamment d'attention et de moyens de calcul le détail de l'évolution du dé, en garantissant les conditions des lancers, des molécules de l'air et de la surface sur laquelle rebondit et finalement s'arrête le dé, alors on pourrait prédire la face que le dé exhibera en fin de course. Il ne s'agit donc pas de vrai hasard.

Un autre exemple permet de mieux cerner cette différence. Pour faire des simulations numériques, les ingénieurs utilisent fréquemment des nombres dits pseudo-aléatoires. Les problèmes ainsi analysés sont innombrables ; pensons par exemple à un avion en développement. Plutôt que de fabriquer de très nombreux prototypes et de les essayer les uns après les autres, les ingénieurs simulent ces prototypes sur de gros ordinateurs. Afin de simuler les conditions de vols, conditions extrêmement changeantes en fonction du vent et de toutes sortes d'aléas, les ingénieurs utilisent dans leurs programmes de simulation des nombres pseudo-aléatoires. Ces nombres sont produits par des ordinateurs, qui sont des machines déterministes – où le hasard ne joue aucun rôle. Donc ces nombres ne sont pas produits au hasard, mais seulement comme les résultats de jets de dés, d'où la terminologie « pseudo-aléatoire ». La relation entre un nombre pseudo-aléatoire et le suivant est prédéterminée, mais elle est suffisamment compliquée pour qu'on ne puisse la deviner facilement. *A priori*, on pourrait se dire que cela suffit, qu'il n'y a pas vraiment de différence entre des nombres pseudo-aléatoires produits par un ordinateur et des nombres produits au vrai hasard. Mais cela n'est pas correct. Il existe des prototypes d'avion qui se comportent bien quand ils sont simulés avec ces nombres pseudo-aléatoires, mais qui, dans la réalité, volent très mal⁴. Ces cas sont rares, mais ils existent toujours, quelle que soit

l'ingéniosité du programme qui produit ces nombres pseudo-aléatoires. En revanche, pour des nombres produits au vrai hasard, ces cas pathologiques n'existent pas. Il y a donc une réelle différence entre le « hasard apparent », comme celui des jets de dés, et le vrai hasard, celui qui est nécessaire pour gagner au jeu de Bell sans permettre de communication. De plus, on voit que l'existence du vrai hasard est une ressource utile pour notre société ; nous reviendrons là-dessus au chapitre 7.

Le vrai hasard permet la non-localité sans communication

En résumé, gagner au jeu de Bell sans communiquer implique nécessairement que les boîtes d'Alice et de Bob produisent les résultats au vrai hasard. Ce hasard est fondamental, non réductible à un mécanisme déterministe complexe. Donc, la nature est capable d'acte de pure création !

Au lieu d'affirmer avec Einstein que Dieu ne joue pas aux dés, demandons-nous plutôt pourquoi il joue aux dés⁵. La réponse est qu'ainsi la nature peut être non locale sans que cela implique de communication sans transmission. En effet, une fois qu'on admet que la nature est capable de produire du vrai hasard, il n'y a aucune raison de limiter la manifestation de ce hasard à un seul endroit bien localisé. Le vrai hasard peut se manifester en plusieurs endroits. Un tel hasard non local ne permet pas de communiquer, il n'y a donc aucune raison de limiter la nature.

Nous avons trouvé que deux concepts apparemment fort éloignés, celui de hasard et celui de localité, sont en fait étroitement liés. Sans vrai hasard, la localité est nécessaire pour éviter la communication sans transmission. Il faut donc se mettre en tête (ou là où se trouve le siège de notre intuition) que le vrai hasard existe et qu'il peut se manifester de façon non locale. Il faut s'habituer à cette idée d'un hasard qui peut se manifester à plusieurs endroits, un hasard non local qui coordonne des résultats se produisant en des lieux fort éloignés. Nous devons

intégrer dans nos intuitions qu'un hasard non local ne permet pas de communiquer : c'est comme si Alice et Bob « n'entendaient » que du bruit, un bruit comme celui du drôle de « téléphone », un bruit inutilisable pour communiquer, mais qui permettrait de gagner au jeu de Bell.

Chapitre 4

LE CLONAGE QUANTIQUE EST IMPOSSIBLE

La non-localité sans communication a d'autres conséquences surprenantes, par exemple ce qu'on appelle le clonage quantique. Dans notre contexte, cela revient à essayer de produire une copie de la boîte de Bob. Cet exemple relativement simple est au cœur de la cryptographie quantique, ainsi que de la téléportation que nous verrons aux chapitres 7 et 8. Il vaut donc la peine de s'y intéresser.

Le clonage d'animaux est devenu courant. Nul doute que le clonage d'êtres humains est à portée de main, et qu'il sera réalisé bien avant la fin du siècle. Au-delà des émotions légitimes et du scandale que cela déclenchera, demandons-nous si le clonage est possible au niveau quantique, c'est-à-dire s'il est possible de copier un système physique appartenant au monde des atomes et des photons. Les physiciens peuvent-ils produire un clone (une copie parfaite) de la boîte d'Alice ou de celle de Bob ?

Soyons plus précis. Il serait absurde de « copier » un électron, puisque tous les électrons sont rigoureusement identiques. Quand on parle de copier un livre, on ne s'intéresse pas simplement à produire un autre livre de même format et avec le même nombre de pages. Une copie doit contenir exactement la même information, donc le même texte et les mêmes images. Le clone d'un électron devra donc lui aussi porter les mêmes « informations » que l'original, donc avoir la même vitesse moyenne, la même indétermination¹ sur cette vitesse, et de même

pour ses autres grandeurs physiques. Seule sa position moyenne sera différente, afin qu'on puisse avoir l'original d'un côté et le clone de l'autre.

Dans ce chapitre, nous allons nous poser la question de la possibilité de cloner la boîte de Bob. Nous avons déjà vu que le cœur de ces boîtes est constitué de cristaux qui portent une caractéristique quantique (la fameuse intrication !); cloner la boîte de Bob revient donc, en fin de compte, à cloner des objets quantiques, y compris ce qui fait leur caractère quantique.

Encadré 8 **Relations d'incertitude d'Heisenberg**

Werner Heisenberg est l'un des principaux fondateurs de la physique quantique. Il est notamment célèbre pour avoir énoncé le principe d'incertitude selon lequel, si l'on mesure précisément la position d'une particule, alors on perturbe forcément sa vitesse; et inversement: si l'on mesure précisément la vitesse d'une particule, on perturbe forcément sa position. On ne peut donc jamais connaître simultanément et avec précision la position et la vitesse d'une particule. La physique quantique moderne a intégré ce principe dans le fait que les particules n'ont tout simplement jamais simultanément une position et une vitesse toutes deux déterminées précisément. En conséquence, on parle plus volontiers d'indéterminisme. Nous garderons la terminologie de relations d'« incertitude » d'Heisenberg, mais éviterons de qualifier des grandeurs physiques d'incertaines: elles sont indéterminées. De même, l'incertitude devient de l'indétermination.

Le clonage quantique permettrait une communication impossible

L'impossibilité de cloner un système quantique est essentielle aux applications telles que la cryptographie quantique et la téléportation quantique que nous présenterons plus loin. Pour démontrer cette impossibilité, nous raisonnerons par l'absurde, c'est-à-dire que nous commencerons par supposer que l'on puisse cloner des systèmes quantiques, et aboutirons à une absurdité : une communication sans transmission. Nous en concluons donc que, puisque la communication sans transmission est impossible, le clonage quantique l'est aussi.

Imaginons que Bob ait réussi à cloner sa boîte. Plus précisément, imaginons que Bob ait réussi à cloner le cristal qui est au cœur de sa boîte, le reste de la boîte n'étant qu'un mécanisme complexe qui ne présente pas de difficulté à être reproduit. Le voici donc avec deux boîtes devant lui, disons l'une sur sa gauche, l'autre sur sa droite. Chacune de ces deux boîtes a une manette qu'il peut pousser vers la gauche ou vers la droite et, une seconde plus tard, chaque boîte produit un résultat. Si ces deux boîtes sont bien des clones, les résultats produits seront tous les deux corrélés avec le résultat de la boîte d'Alice de telle sorte que chaque boîte gagnera son jeu de Bell avec Alice. Cependant, Bob peut décider de ne pas choisir, mais d'essayer les deux choix en même temps : il pousse vers la gauche la manette de sa boîte de gauche et vers la droite la manette de sa boîte de droite. On va voir que Bob peut maintenant déduire de ses deux résultats le choix qu'Alice a fait à distance. Commençons par le cas où les deux résultats de Bob sont identiques, deux fois 0 ou deux fois 1. Dans ce cas, Alice a probablement choisi $x = 0$. En effet, si Alice avait choisi $x = 1$, alors le résultat de la boîte de droite de Bob devrait être différent du résultat d'Alice [car $(x,y) = (1,1) \Rightarrow a \neq b$], alors que le résultat de la boîte de gauche de Bob devrait être identique à celui d'Alice [car $(x,y) = (1,0) \Rightarrow a = b$]. En revanche, si les deux résultats de Bob diffèrent, alors

Alice a probablement fait le choix $x = 1$. L'encadré 9 résume ce petit raisonnement à l'aide d'arithmétique binaire élémentaire.

Encadré 9 Le théorème de « non-clonage »

Notons b_g et b_d les résultats produits par les deux boîtes de Bob, celle à sa gauche et celle à sa droite. Gagner au jeu de Bell implique que les deux relations suivantes sont souvent satisfaites : $a + b_g = x \cdot y_g$ et $a + b_d = x \cdot y_d$. Additionnons ces deux équations : $a + b_g + a + b_d = x \cdot y_g + x \cdot y_d$. On se rappelle que tous ces symboles représentent des bits (0 ou 1) et que l'addition est « modulo 2 » afin que le résultat soit toujours un bit ; donc $a + a = 0$. On se rappelle aussi que Bob pousse la manette de sa boîte de gauche vers la gauche, donc $y_g = 0$, et la manette de sa boîte de droite vers la droite, donc $y_d = 1$. On obtient finalement : $b_g + b_d = x$. Bob peut donc, en additionnant simplement ses deux résultats, deviner avec une grande probabilité le choix x d'Alice.

Donc, si Bob pouvait cloner sa boîte, il pourrait deviner avec une forte probabilité quel choix a fait Alice, et ce malgré la distance qui les sépare. Il y aurait donc communication sans transmission, à une vitesse arbitraire. Certains diront que Bob peut aussi se tromper en devinant le choix d'Alice, puisque Alice et Bob ne réalisent pas un score de 4, mais seulement un score nettement supérieur à 3. Effectivement, Bob peut parfois se tromper ; toutefois, le fait qu'il devine juste bien plus souvent que 1 fois sur 2 suffit à rendre possible une communication². Cette communication serait un peu bruitée et il faudrait la répéter un grand nombre de fois (pour lesquelles Alice ferait chaque fois le même choix) afin que Bob finisse par deviner pratiquement à coup sûr le choix d'Alice. En fait, c'est ce qui se passe pour toutes les communications numériques : Internet et les autres protocoles de communication découpent nos messages en petits morceaux qu'ils envoient au destinataire et comme il y a toujours une probabilité d'erreur, le message est éventuellement ren-

voyé plusieurs fois jusqu'à ce que la probabilité qu'une erreur subsiste soit considérée comme négligeable.

En conclusion, la possibilité de gagner au jeu de Bell implique l'impossibilité de cloner des systèmes quantiques. Les physiciens parlent du « théorème de non-clonage ». C'est un résultat extrêmement important en physique quantique. Sa démonstration mathématique est élémentaire, mais nous avons vu que ce théorème se déduit aussi très facilement de la non-localité sans communication, ce qui met bien en évidence le rôle fondamental de ce concept.

Cloner l'ADN ?

Mais alors, s'il est impossible de cloner des systèmes quantiques, comment peut-il être possible de cloner des animaux ? L'ADN, macromolécule biologique, n'est-elle pas aussi un système quantique ? Excellente question ! Il est d'ailleurs remarquable que c'est en se posant cette question que le prix Nobel de physique, Eugene Wigner, a le premier posé la question du clonage quantique³. Il en a aussi conclu à l'impossibilité du clonage en biologie, mais il a commis là une erreur. L'ADN est bien quantique (enfin fort probablement, cela n'a pas encore été démontré expérimentalement, mais aucun physicien n'en doute), mais l'information génétique est codée dans l'ADN en n'utilisant qu'un tout petit peu des possibilités qu'offre la physique quantique, de sorte que cette petite quantité d'information peut être clonée⁴. De manière générale, on peut se demander quel rôle joue la physique quantique en biologie, thème de recherche fort actuel.

Intermède : clonage approximatif

Pour terminer ce chapitre, permettez-moi un petit intermède non essentiel pour la suite, mais qui intéressera les lecteurs scientifiques.

Notons, mais cette fois sans démonstration, que la théorie quantique permet un clonage approximatif, un peu comme de mauvaises copies, et que le meilleur clonage possible est précisément caractérisé par le fait qu'il est juste suffisamment mauvais pour interdire toute communication sans transmission⁵.

Le théorème de « non-clonage » est intimement lié à une grande partie de la physique quantique. En particulier, comme déjà mentionné, il est essentiel aux applications telles que la cryptographie quantique (chapitre 7) et la téléportation quantique (chapitre 8). Il est aussi indispensable pour que les célèbres relations d'incertitude d'Heisenberg aient un sens (voir l'encadré 8, p. 64). En effet, si l'on pouvait parfaitement cloner un système quantique, on pourrait ensuite mesurer la position, par exemple, sur l'original et la vitesse sur le clone. On obtiendrait ainsi en même temps la position et la vitesse d'une particule, chose impossible selon le principe d'incertitude. Une autre conséquence importante du théorème de « non-clonage » est que l'émission stimulée qui est à la base des lasers n'est pas possible sans avoir aussi de l'émission spontanée. Sinon, on pourrait utiliser l'émission stimulée pour cloner parfaitement l'état d'un photon (sa polarisation par exemple). À nouveau, le rapport entre émission stimulée et émission spontanée est très précisément à la limite du clonage optimal compatible avec de la non-localité sans communication⁶. Tout se tient merveilleusement : la théorie quantique est d'une remarquable cohérence, d'une grande esthétique. Einstein a été le premier à décrire le rapport entre émission stimulée et émission spontanée ; il aurait été étonné d'apprendre que sa formule découle très précisément du concept de non-localité, concept tant honni par le génial savant.

Finalement une dernière remarque concernant le lien entre clonage et non-localité. Nous avons vu que l'impossibilité de communication sans transmission impose une limite à la qualité du clonage de la boîte de Bob en deux boîtes. Qu'en est-il si on remplace le jeu de Bell par un jeu (une inégalité) où Bob a davantage de possibilités, mettons que sa manette peut être poussée dans n directions différentes ? Dans ce cas, l'impossibilité de communication sans transmission impose une limite au clonage de la boîte

de Bob en n boîtes-clones (et on retrouve toujours la limite du clonage quantique optimal). Une conséquence est que pour démontrer de la non-localité, Bob – et de même Alice – doit avoir plus de choix possibles que de boîtes, donc il doit avoir à faire un réel choix, il ne peut pas se contenter de faire tous les choix en parallèles⁷. On voit ici pointer l'importance du libre arbitre, ou plus prosaïquement l'importance de la possibilité de faire des choix indépendants pour Alice et pour Bob : sans choix indépendants, pas de non-localité.

Chapitre 5

L'INTRICATION QUANTIQUE

Selon la physique quantique, l'explication du gain au jeu de Bell, donc d'un score supérieur à 3, est l'intrication. Erwin Schrödinger, un des pères de la physique quantique, a le premier fait remarquer que l'intrication n'est pas simplement une caractéristique parmi d'autres de la physique quantique, mais sa caractéristique principale¹ : « L'intrication n'est pas une, mais plutôt la caractéristique de la physique quantique, celle qui nous force à nous affranchir complètement des modes de pensée classiques. »

Dans ce chapitre, nous allons présenter cette propriété remarquable du monde des atomes et des photons².

Holisme quantique

En gros, ce que dit cette drôle de physique quantique est qu'il est possible et même fréquent que deux objets éloignés l'un de l'autre ne forment, en réalité, qu'un seul objet ! C'est cela, l'intrication. Ainsi, si l'on touche l'un des deux, tous deux tressaillent. Tout d'abord, rappelons-nous que quand on « touche », c'est-à-dire quand on fait une mesure sur un objet quantique, celui-ci produit une réponse – une réaction – au hasard, un résultat parmi un certain nombre possible, avec une probabilité bien définie que la théorie quantique prédit très précisément. Le hasard implique qu'on ne peut pas utiliser le fait que l'objet intriqué au premier réagisse également,

pour envoyer une information. En effet, le récepteur ne recevrait que du bruit, un tressaillement au hasard. On retrouve donc ici l'importance du vrai hasard. Mais, me direz-vous, si on ne touche pas le premier objet, le deuxième ne tressaille pas. Je peux donc envoyer une information en décidant de toucher ou de ne pas toucher le premier objet. Seulement voilà : comment savoir si le deuxième objet a tressailli ? Pour cela, il faut effectuer une mesure, qui fera tressaillir l'objet... En résumé, l'idée que deux objets intriqués puissent ne former qu'un tout, si contre-intuitive soit-elle, n'est pas à exclure avec de simples arguments.

En théorie, tout objet peut être intriqué, mais en pratique les physiciens ont surtout démontré l'intrication d'atomes, de photons et autres particules élémentaires. Les plus grands objets qui ont pu être intriqués sont des cristaux, comme ceux qui se trouvent dans les boîtes du jeu de Bell. L'intrication est similaire quels que soient les objets intriqués ; nous illustrerons cette propriété « magique » du monde quantique à l'aide d'électrons, les petites particules qui transportent le courant électrique.

Indéterminisme quantique

Prenons un exemple. Un électron peut se trouver dans un état dans lequel sa position est indéterminée : il n'a tout simplement pas de position précise, un peu comme un nuage. Bien sûr, un nuage a une position moyenne (son centre de masse, comme disent les physiciens), et l'électron aussi a une position moyenne. Mais, et c'est là l'énorme différence avec un nuage, l'électron n'est pas constitué d'une multitude de gouttes d'eau ni de gouttes d'autre chose : l'électron est indivisible. Et, bien qu'indivisible, il n'a pas une position, mais un nuage de positions potentielles. Si l'on procède malgré cela à une mesure de position, l'électron répondra : « Je suis là. » Mais cette réponse a été produite lors de la mesure, au hasard. L'électron n'avait pas de position mais, lors du processus de mesure, on l'a forcé à répondre à une question qui n'avait pas de réponse prédéterminée : le hasard quantique est du vrai hasard.

Formellement, l'indéterminisme se décrit à l'aide du principe de « superposition ». Si un électron peut être « ici » ou peut être « un mètre à droite d'ici », alors cet électron peut tout aussi bien être en état de superposition d'« ici » et d'« un mètre à droite d'ici », donc être « ici *et* à un mètre d'ici ». Dans cet exemple, l'électron est délocalisé en deux endroits à la fois. Il peut sentir ce qui se passe « ici », par exemple dans l'une des fentes de Young et sentir ce qui se passe à « un mètre à droite d'ici », dans l'autre fente de Young (le nom de Thomas Young (1773-1829) est associé à une célèbre expérience dans laquelle une particule passe simultanément par deux fentes voisines). Il est donc bien « ici *et* un mètre à droite d'ici ». Par contre, si l'on mesure sa position, on obtient, au hasard, soit le résultat « ici » soit le résultat « à un mètre d'ici ».

Intrication quantique

Nous venons de voir qu'un électron peut ne pas avoir de position. De même, deux électrons peuvent très bien, chacun, ne pas avoir de position. Mais, à cause de l'intrication, la distance entre les deux électrons peut, elle, être parfaitement bien déterminée. Ainsi, chaque fois que l'on mesure les positions des deux électrons, on obtient deux résultats, chacun aléatoire, mais dont la différence est toujours exactement la même ! Par rapport à leurs positions moyennes, les deux électrons produiront toujours le même résultat, bien que ce résultat soit le fruit d'un hasard vrai : si l'un des électrons est mesuré un peu à droite de sa position moyenne, alors l'autre sera aussi mesuré un peu à droite (et très précisément du même « un peu », c'est-à-dire exactement à la même distance de son centre de masse). Et cela est vrai même si les deux électrons sont très éloignés l'un de l'autre.

La position d'un électron par rapport à l'autre est donc bien déterminée, même si la position de chaque électron ne l'est pas. En général, des systèmes quantiques intriqués peuvent être dans un état bien déterminé, bien que chaque système soit lui-même dans un état indéterminé. Lorsqu'on effectue des mesures sur deux

systèmes intriqués, les résultats sont régis par le hasard, mais par le *même* hasard ! Le hasard quantique est non local.

L'intrication peut ainsi être définie comme la capacité de systèmes quantiques à produire le même résultat quand on mesure sur chacun d'eux la même grandeur physique. Elle se décrit à l'aide du principe de superposition appliqué simultanément à plusieurs systèmes. Par exemple, deux électrons peuvent être « l'un ici et l'autre là » ou être « le premier un mètre à droite d'ici et l'autre un mètre à droite de là ». Selon le principe de superposition, ces deux électrons peuvent également être dans l'état « ici et l'autre là » superposé à « le premier un mètre à droite d'ici et l'autre un mètre à droite de là ». Cet état est un « état intriqué ». Mais l'intrication est bien davantage que le principe de superposition ; c'est elle qui introduit les corrélations non locales en physique. Par exemple, dans l'état intriqué ci-dessus, aucun électron n'a de position prédéterminée, mais si une mesure de la position du premier électron produit le résultat « ici », la position de l'autre électron est immédiatement déterminée à « là », même sans mesure de la position de ce deuxième électron.

Comment est-ce possible ? !

Comment deux électrons peuvent-ils avoir une position relative bien déterminée sans avoir chacun une position déterminée ? Dans le monde des objets usuels, cela est impossible. Il est donc naturel de soupçonner que la physique quantique ne fournit pas une description complète de la position des électrons, et qu'une théorie plus complète décrirait les électrons comme possédant toujours une position bien déterminée, mais cachée. C'est l'intuition des « variables cachées locales », locales car chaque électron a sa position indépendamment des autres électrons.

Toutefois, cette hypothèse de positions cachées n'est pas sans poser problème. En effet, la position d'un électron n'est pas la seule variable mesurable. On peut aussi mesurer sa vitesse, laquelle est également indéterminée : un électron a bien une vitesse moyenne, mais la vitesse produite lors d'une mesure est, tout comme pour

la position, produite au hasard parmi la multitude d'un nuage de valeurs possibles. Et l'intrication permet à nouveau à deux électrons de n'avoir, chacun, aucune vitesse déterminée tout en ayant exactement la même vitesse, et cela reste vrai même si les électrons sont très éloignés l'un de l'autre.

L'intrication va encore un pas plus loin : les deux électrons peuvent chacun n'avoir ni position ni vitesse, mais être intriqués de telle sorte que les différences entre leurs positions et entre leurs vitesses soient parfaitement déterminées. S'il y a des positions cachées, il doit donc y avoir aussi des vitesses cachées. Mais cela contredit le principe d'incertitude d'Heisenberg, principe qui est à la base du formalisme quantique (voir l'encadré 8, p. 64). Werner Heisenberg, son mentor Niels Bohr et ses amis se sont insurgés contre l'hypothèse des positions et vitesses cachées, appelées « variables cachées locales ». De l'autre côté, Erwin Schrödinger, Louis de Broglie et Albert Einstein défendaient l'hypothèse des variables cachées comme étant bien plus naturelle que l'hypothèse de l'intrication, qui implique un hasard vrai capable de se manifester simultanément en plusieurs endroits à la fois.

À l'époque, entre 1935 et 1964, personne n'avait encore trouvé l'argument de John Bell introduit au chapitre 2. Ainsi, aucune expérience physique ne permettait de ramener le débat autour des variables cachées locales à un véritable test : peut-on, oui ou non, gagner au jeu de Bell plus souvent que 3 fois sur 4 ? S'il y avait des variables cachées locales, les systèmes quantiques ne pourraient pas gagner au jeu de Bell : les variables cachées locales (comme les gènes de jumeaux) joueraient le rôle des programmes qui déterminent localement, chez Alice et chez Bob, les résultats produits par les deux boîtes. Or nous avons vu que si les résultats sont déterminés localement, alors Alice et Bob ne peuvent pas gagner au jeu de Bell plus souvent que 3 fois sur 4.

En l'absence de test de Bell, cette question s'est rapidement transformée en un débat affectif. Schrödinger a écrit que si cette histoire d'intrication était vraie, il regretterait d'y avoir contribué ! Concernant Bohr, il suffit de lire sa réponse à l'article de 1935

d'Einstein, Podolski et Rosen (le paradoxe EPR³) pour se convaincre qu'il faisait de cette bataille une affaire personnelle.

Einstein est le géant des géants pour avoir, des siècles après Newton, rendu la théorie de la gravitation locale : avant la théorie de la relativité générale (1915), la physique fournissait une description non locale de la gravitation : si on déplace un caillou sur la Lune, notre poids⁴ sur Terre est immédiatement affecté ; on pourrait donc, en principe, communiquer instantanément à travers tout l'univers. Avec la théorie d'Einstein, la gravitation devient un phénomène qui, comme tous les autres phénomènes connus en 1917, se propage à vitesse finie de proche en proche. Ainsi, selon la relativité d'Einstein, si l'on déplace un caillou sur la Lune, la Terre et tout l'univers en sont informés par une « onde gravitationnelle » qui se propage à la vitesse de la lumière. Ce n'est qu'environ une seconde plus tard (la Lune est à 380 000 kilomètres) que notre poids, à nous Terriens, est affecté. Einstein, l'homme qui a rendu la physique locale se trouva environ dix ans après sa découverte héroïque à nouveau confronté à de la non-localité. Même si la non-localité quantique est très différente de celle de la gravitation de Newton, il ne pouvait rester indifférent à cette menace à son édifice majeur. Sa réaction est donc bien compréhensible et en outre logique : pourquoi faire davantage confiance aux relations d'incertitude d'Heisenberg qu'au déterminisme et à la localité ?

Comment l'intrication permet de gagner au jeu de Bell

Le mot « quantique » qui qualifie la nouvelle physique des années 1920 vient du fait que les énergies possibles d'un atome sont quantifiées, c'est-à-dire que l'énergie ne peut pas prendre n'importe quelle valeur – seulement un certain nombre de valeurs possibles. En fait, il y a beaucoup de grandeurs physiques, en plus de l'énergie, qui ne peuvent prendre qu'un nombre fini de valeurs, et qui sont donc quantifiées. Un cas simple et fréquent est celui où ce nombre de valeurs possibles n'est que de deux ; on parle alors de bit quantique ou, comme disent les physiciens, de « qubit ».

Les différentes mesures qui peuvent être réalisées sur un qubit peuvent être représentées comme une « direction ». Dans le cas de la polarisation d'un photon, cette direction est directement liée à l'orientation du polariseur⁵. Ainsi, on peut représenter ces directions de mesure comme des angles sur un cercle, voir la figure 3a. Chaque fois que l'on mesure un qubit selon l'une de ces directions, on trouve soit le résultat 0 qui correspond à « parallèle » à cette direction, soit le résultat 1 qui correspond à « antiparallèle » à cette direction (qui pointe dans la direction opposée). Inverser la direction de mesure revient simplement à inverser le résultat : le résultat 0 dans une direction est identique au résultat 1 dans la direction opposée. Précisons que pour chaque qubit on a le choix de la direction de mesure. Comme cette mesure perturbe le qubit, on ne peut pas mesurer à nouveau le même qubit dans une autre direction. Par contre, on sait produire de nombreux qubits tous préparés de la même manière (tous dans le même état, dirait un physicien). On peut donc choisir des directions de mesures différentes pour les différents qubits, et ainsi accumuler des statistiques.

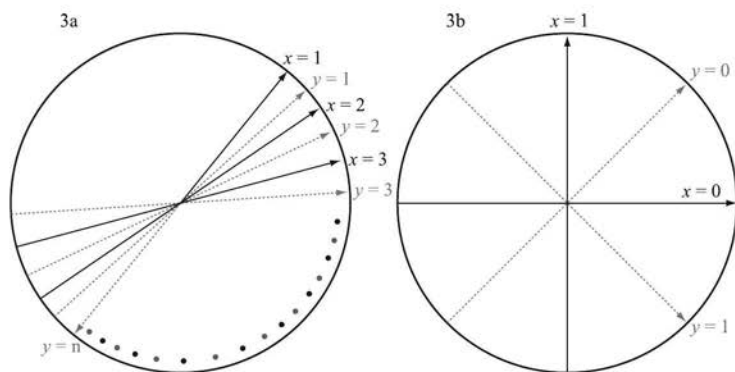


Figure 3. Un bit quantique (un qubit) peut être mesuré selon différentes « directions ». Si deux qubits sont intriqués et qu'on les mesure selon deux directions proches l'une de l'autre, les résultats sont souvent identiques, donc fortement corrélés. Par exemple, sur la figure 3a, les choix de mesure $x = 1$ et $y = 1$ donnent lieu à des résultats fortement corrélés, de même pour $x = 2$ et $y = 1$, etc. Néanmoins, les choix $x = 1$ et $y = n$ donnent lieu à des résultats différents. Pour le jeu de Bell, les boîtes d'Alice et Bob utilisent les directions de mesure indiquées sur la figure 3b.

La probabilité qu'un qubit produise le résultat 0 dépend de l'état dans lequel se trouve le qubit. Mais quel que soit cet état, les probabilités que le qubit produise le résultat 0 selon deux directions proches sont également proches : il y a continuité de la probabilité d'un résultat en fonction de la direction de mesure.

Si deux qubits sont intriqués⁶ et qu'on les mesure tous deux selon la même direction, on trouvera toujours le même résultat, soit deux fois 0, soit deux fois 1. Pourquoi trouve-t-on toujours le même résultat ? Ça, c'est la magie de l'intrication. Comme discuté dans la section « Intrication quantique » (p. 73), chaque qubit a un nuage de résultats potentiels, mais la différence entre les résultats de deux qubits intriqués est nulle. Donc, si Alice et Bob partagent une paire de qubits intriqués et si Alice mesure son qubit selon une direction A et Bob mesure le sien selon une direction B proche de A, alors la probabilité que les deux résultats soient identiques est proche de 1. Mettons que, comme sur la figure 3a, la direction de Bob soit légèrement à la droite de celle d'Alice. Imaginons maintenant qu'Alice utilise une deuxième direction $\tilde{A}$ toujours proche de celle de Bob, mais cette fois-ci légèrement à droite de celle de Bob. Ces deux directions sont à nouveau proches l'une de l'autre, donc la probabilité d'obtenir deux fois le même résultat est à nouveau proche de 1.

On peut ainsi continuer de proche en proche jusqu'à ce que la dernière direction de Bob se trouve opposée à la première direction d'Alice. Mais alors, pour des directions opposées, les résultats seront forcément opposés ! On retrouve là l'esprit du jeu de Bell : les résultats sont presque toujours identiques, sauf dans un cas où ils sont différents. Dans le cas du jeu de Bell, ce cas spécial où les résultats doivent être opposés correspond à Alice et Bob poussant tous deux leur manette vers la droite. Dans le cas de deux qubits intriqués, ce cas spécial correspond à Alice utilisant sa première direction de mesure et Bob utilisant sa dernière direction. Suivant le nombre de directions de mesure considérées, on obtient différentes inégalités de Bell ; pour le jeu de Bell, Alice et Bob n'utilisent chacun que deux directions, comme illustré sur la figure 3b. Avec cette stratégie, ils réalisent un score de 3,41.

La non-localité quantique

Faisons un bilan intermédiaire. La théorie quantique prédit, et beaucoup d'expériences ont confirmé, que la nature est capable de produire des corrélations entre deux événements distants qui ne s'expliquent ni par une influence d'un événement sur l'autre, ni par une cause locale commune. Tout d'abord, il nous faut être un peu plus précis. Ce qui est exclu est une influence qui se propage continûment de proche en proche à une vitesse arbitrairement grande, mais pas plus rapide que la lumière (aux chapitres 9 et 10 nous verrons qu'on peut même étendre ce résultat à n'importe quelle vitesse finie, même à des vitesses plus grandes que celle de la lumière, pour autant qu'elles ne soient pas infinies). De façon similaire, ce qui est exclu, ce sont des causes communes se propageant continûment de proche en proche. Ces deux types d'explications sont dits « basés sur des variables locales », car tout se passe localement et évolue de proche en proche. D'où la terminologie standard d'explication locale (ou par variable locale⁷).

Le fait formidable est que, une fois exclue toute explication sous forme d'influence ou de cause commune se propageant continûment de proche en proche, il ne reste pas d'autre explication locale. Cela signifie qu'il n'existe aucune explication sous la forme d'une histoire qui se déroule dans l'espace au cours du temps et qui raconte comment ces fameuses corrélations sont produites. Pour le dire de façon crue : ces corrélations non locales semblent, en quelque sorte, surgir de l'extérieur de l'espace-temps !

Mais n'allons-nous pas trop vite ? Et que signifie « corrélations non locales » ? Commençons par le moins difficile : la deuxième question. Comme ces corrélations n'ont pas d'explications locales, on dit qu'elles sont non locales. Non local signifie donc tout simplement « pas local » ou, de façon plus pédante, non descriptible par des variables locales. Le qualificatif « non local » est donc négatif ; il ne dit pas comment sont de telles corrélations, mais comment elles ne sont pas. Comme si on vous disait qu'un objet n'est pas

rouge : cela ne vous dit pas de quelle couleur est cet objet, seulement qu'il n'est pas rouge.

Un aspect très important du fait que « non local » est un qualificatif négatif est qu'il ne signifie pas du tout qu'on peut utiliser des corrélations non locales pour communiquer, ni instantanément, ni à une vitesse plus grande, ni plus petite que la lumière : les corrélations quantiques non locales ne permettent pas du tout de communiquer. Rien de ce que nous pouvons contrôler dans les expériences de corrélations non locales ne va plus vite que la lumière ; il n'y a aucune transmission, donc aucune communication, mais les résultats observés ne peuvent pas être expliqués par des modèles locaux (ne peuvent pas être racontés par des histoires dans l'espace et le temps).

L'absence de communication évite à la physique quantique d'être en conflit direct avec la relativité. Certains parlent de coexistence pacifique⁸, une terminologie surprenante pour parler des deux piliers de la physique d'aujourd'hui. Il n'en reste pas moins que ces deux piliers reposent sur des fondements qui sont en totale opposition. La physique quantique est intrinsèquement aléatoire, la relativité profondément déterministe ; la physique quantique prédit l'existence de corrélations impossibles à décrire à l'aide de variables locales, alors que tout en relativité est fondamentalement local.

Origine des corrélations quantiques

Pour terminer ce chapitre, demandons-nous comment le formalisme mathématique de la physique quantique décrit les corrélations non locales. Après tout, le formalisme fonctionne très bien. Ne peut-il nous raconter comment surgissent les corrélations non locales ?

Selon ce formalisme, ces drôles de corrélations proviennent de l'intrication qui est décrite comme une sorte d'onde qui se propage dans un espace bien plus grand que notre espace à trois dimensions. Cet espace, dit « de configuration » dans le jargon

des physiciens, dans lequel se propage cette « onde », a une dimension qui dépend du nombre de particules intriquées : trois fois le nombre de particules intriquées. Dans cet espace de configuration, chaque point représente les positions de toutes les particules, même si elles sont fort éloignées les une des autres. Ainsi, un événement local dans l'espace de configuration peut impliquer des particules distantes. Mais nous, pauvres humains, ne voyons pas l'espace de configuration, mais seulement les ombres de ce qui s'y déroule : chaque particule projette une ombre dans notre espace à trois dimensions, ombre correspondant à sa position dans notre espace. Les ombres d'un point peuvent donc être éloignées les une des autres, même si ce sont des ombres d'un même point de l'espace de configuration (figure 4). Voici une « explication » bien bizarre, pour autant qu'on puisse appeler cela une explication. En quelque sorte, la « réalité » se déroulerait dans un autre espace que le nôtre, et nous ne verrions que des ombres, comme dans l'image de la grotte que Platon utilisait déjà il y a des siècles pour évoquer la difficulté de connaître la « vraie réalité ».

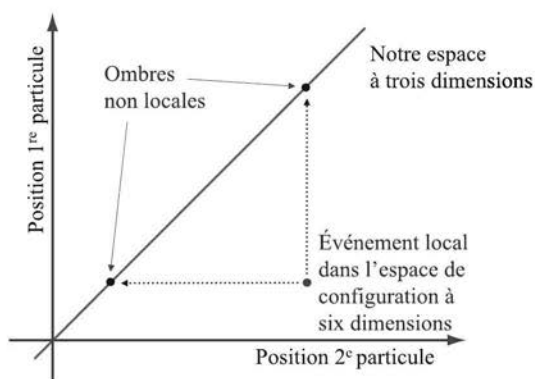


Figure 4. La théorie quantique utilise un espace de grande dimension pour décrire les particules. Pour deux particules pouvant se propager seulement sur une ligne, cet espace est de dimension deux, comme une feuille de papier. Ainsi, chaque point de cette figure représente les positions des deux particules. La diagonale représente notre espace habituel. Ainsi, un événement dans le grand espace projette deux ombres dans notre espace. Ces ombres peuvent être éloignées l'une de l'autre.

Cette « explication » de l'origine des corrélations quantiques non locales semble plus mathématique que physique. En effet, il semble difficile de croire que la vraie réalité se déroule dans un espace dont la dimension dépend du nombre de particules, surtout quand on sait que ce nombre varie au cours du temps. En résumé, le formalisme mathématique de la théorie quantique ne fournit aucune explication, il permet seulement de calculer. Certains physiciens en concluent qu'il n'y a rien à expliquer : « Il n'y a qu'à calculer », affirment-ils.

Chapitre 6

EXPÉRIENCE

Dans ce chapitre j'aimerais vous présenter une expérience de Bell, celle que nous avons réalisée à Genève en 1997 entre les villages de Bernex et de Bellevue, distants de plus de 10 kilomètres à vol d'oiseau, en utilisant le réseau de fibre optique de notre opérateur national Swisscom. La figure 5 illustre cette expérience de Bell, la première réalisée hors laboratoire.

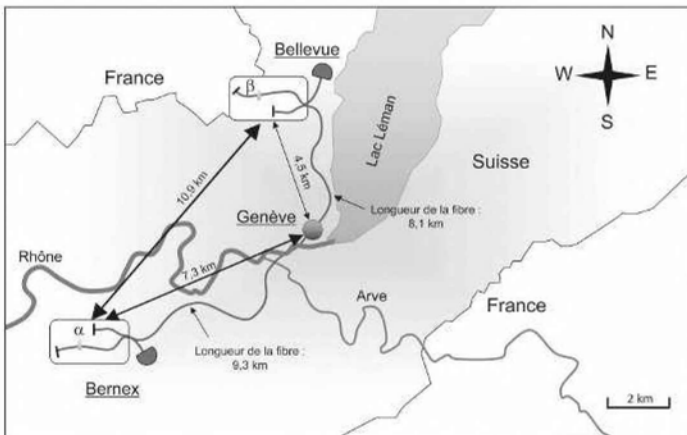


Figure 5. Schéma de notre expérience de corrélations non locales entre les villages de Bernex et Bellevue, distants de plus de 10 kilomètres à vol d'oiseau. Quand nous avons réalisé cette expérience c'était la première fois qu'on jouait au jeu de Bell hors laboratoire. Les fibres optiques utilisées pour distribuer l'intrication sont celles du réseau commercial de l'opérateur Swisscom.

Produire des paires de photons

Commençons par le cœur de l'expérience, la production de deux photons intriqués.

Dans un cristal, les atomes sont alignés de façon très régulière (précisons d'emblée que ce cristal source d'intrication n'a rien à voir avec les cristaux des boîtes d'Alice et de Bob). Chaque atome est entouré d'un nuage d'électrons. Quand on excite ces atomes en les illuminant, ces nuages oscillent autour des noyaux des atomes. Si cette oscillation est asymétrique, c'est-à-dire que les nuages électroniques s'éloignent des noyaux plus facilement dans une direction que dans l'autre, on a affaire à un cristal « non linéaire ». Pourquoi cette terminologie ? Quand un photon interagit avec un atome, il excite le nuage électronique, qui se met à osciller. Si le nuage oscille de façon symétrique, il se désexcite en réémettant un photon similaire au photon initial, dans n'importe quelle direction. C'est la fluorescence. En revanche, si le nuage oscille de façon asymétrique, le nuage se désexcite en réémettant un photon d'une couleur différente.

Mais la couleur d'un photon détermine son énergie, et une des lois de base de la physique est que l'énergie est conservée. Ma description ci-dessus est donc forcément incomplète. Pourtant, des cristaux non linéaires existent qui, illuminés par une lumière infrarouge, produisent une belle lumière verte. C'est ainsi que fonctionnent les pointeurs laser verts qui sont, depuis quelques années, fréquemment utilisés dans les conférences. L'explication est qu'il faut deux photons de basse énergie, dans l'infrarouge, pour produire un seul photon de plus grande énergie, dans le vert. L'intensité de la lumière verte varie donc comme le carré de l'intensité infrarouge¹, d'où la terminologie de « non linéaire ». Un cristal non linéaire est donc capable de modifier la couleur d'un faisceau lumineux. Au niveau des photons, ce processus implique forcément plusieurs photons de basse énergie.

Les lois de la physique sont réversibles. Cela implique que si un processus élémentaire peut se dérouler dans un sens, le processus inverse doit aussi être possible. Il doit donc être possible

d'envoyer un photon vert sur un cristal non linéaire et de récupérer deux photons infrarouges. Nous voici avec un mécanisme produisant des paires de photons².

Produire de l'intrication

Reste à comprendre pourquoi ces photons sont intriqués. Pour cela, il nous faut rappeler que les particules quantiques, comme par exemple les photons, ont généralement des grandeurs physiques (position, vitesse, énergie, etc.) indéterminées. Par exemple, un photon porte une certaine énergie. Mais cette énergie est indéterminée : elle est en moyenne de telle ou telle valeur, mais avec une indétermination qui peut être grande. Il ne s'agit pas d'une incertitude de notre connaissance de l'énergie du photon, mais bien d'une indétermination *intrinsèque* au photon qui, lui-même, ne « connaît pas » exactement son énergie. En clair, le photon n'a pas une énergie précise, mais tout un spectre d'énergies potentielles (comme la position d'un électron telle que décrit au chapitre 5). Si l'on mesure cette énergie très précisément, on trouvera un résultat au hasard (le fameux vrai hasard !) parmi tout le spectre possible. Ici, il faut bien comprendre que pour produire du vrai hasard – ce qui, comme, on l'a vu, est nécessaire pour gagner au jeu de Bell – il faut que certaines grandeurs physiques n'aient pas de valeur précise déterminée : elles doivent être indéterminées et ne prendre une valeur précise que lorsqu'on la mesure précisément. Quelle valeur précise ? C'est cela, le hasard quantique.

De même que son énergie, l'âge d'un photon, c'est-à-dire le temps qui s'est écoulé depuis qu'une source lumineuse l'a émis, peut être indéterminé. Ainsi, l'ensemble des âges potentiels d'un photon peut s'étendre sur quelques milliardièmes de seconde ou jusqu'à plusieurs secondes, selon la façon dont le photon a été émis. Les célèbres relations d'incertitude d'Heisenberg (encadré 8, p. 64), pour les photons, énoncent que plus l'âge d'un photon est bien déterminé, plus grande est son indétermination en énergie. Et réciproquement : plus l'énergie d'un photon est bien déterminée, plus grande est l'indétermination de son âge.

Revenons maintenant à nos cristaux non linéaires et aux paires de photons qu'ils génèrent. Imaginons qu'un photon vert d'une énergie très précise, c'est-à-dire dont l'indétermination en énergie est très petite, excite un cristal non linéaire. Le photon se transforme en deux photons infrarouges, qui ont chacun une énergie indéterminée, mais de façon que la somme des énergies des deux photons infrarouges soit précisément égale à celle du photon vert. On a donc deux photons infrarouges ayant chacun une énergie indéterminée, mais dont la somme des deux énergies est déterminée d'une façon bien précise.

Les énergies des deux photons sont donc corrélées : si l'on mesure ces énergies et si l'on trouve une valeur supérieure à la moyenne pour l'un des photons, l'autre aura forcément une énergie inférieure à la moyenne. On voit là un aspect surprenant de la non-localité : l'énergie d'un photon, initialement indéterminée, peut être déterminée à la suite d'une mesure effectuée sur l'autre photon...

Mais ce n'est pas encore tout à fait suffisant : pour jouer au jeu de Bell, il faut avoir le choix entre au moins deux types de mesure, correspondant aux deux positions de la manette. Comme le photon vert initial a une énergie bien précise, il doit avoir, pour respecter les relations d'incertitude d'Heisenberg, un âge très indéterminé. Qu'en est-il des paires de photons infrarouges ? Comme leurs énergies sont indéterminées, leurs âges peuvent être déterminés relativement précisément, bien plus précisément que l'âge du photon vert.

Se peut-il qu'un des photons infrarouges soit plus âgé que l'autre ? Non, pour cela il faudrait que ce photon ait été produit par le cristal avant l'autre. Mais si un photon infrarouge existait avant l'autre, il y aurait un moment pendant lequel la loi de conservation de l'énergie ne jouerait pas, ce qui est impossible : les deux photons infrarouges doivent nécessairement être créés simultanément, en même temps que le photon vert est détruit. Quel est ce moment où les deux photons infrarouges sont créés ? La réponse est que le moment de création des deux photons infrarouges est indéterminé, tout comme l'est l'âge du photon vert.

En résumé, les deux photons infrarouges ont le même âge, mais cet âge est indéterminé : si l'on mesure l'âge d'un photon infrarouge, on trouve un résultat au vrai hasard. Mais, dès cet instant, l'âge du deuxième

photon devient déterminé. Voici la deuxième corrélation quantique dont nous avons besoin pour jouer – et gagner – au jeu de Bell³.

Une fois que les paires de photons arrivent à destination, l'un dans la boîte d'Alice, l'autre dans celle de Bob, ils devraient, idéalement, être mis en mémoire. De telles mémoires, dites quantiques, sont encore en développement dans les labos. Aujourd'hui, elles ne sont pas très efficaces et ne peuvent garder un photon en mémoire que pendant une infime fraction de seconde. Donc, en pratique, par la force des choses, on demande à Alice et à Bob de faire leur choix légèrement avant que les photons arrivent. Ainsi, dès qu'ils arrivent dans les boîtes, ils sont immédiatement mesurés. Suivant les positions des manettes ils subiront l'une ou l'autre des deux mesures, énergie ou âge (énergie ou temps, diraient les physiciens). Finalement, chaque boîte produira le résultat de ces mesures. Mais, en principe, on pourrait stocker suffisamment de photons dans les boîtes d'Alice et de Bob pour jouer au jeu de Bell comme décrit au chapitre 2 (et la technologie permettra bientôt de le faire réellement). Les cristaux au cœur des deux boîtes sont donc des mémoires quantiques qui ont stocké quelques centaines de photons intriqués, comme les cristaux-mémoires-quantiques que nous développons à Genève (mais avec un temps de stockage et une efficacité qu'il nous faut encore grandement améliorer !).

Intrication de bit quantique

Nous venons de voir comment produire deux photons infrarouges intriqués en énergie et en âge. Si l'on mesure l'énergie ou l'âge de ces deux photons, on obtient des résultats parfaitement corrélés. La manette des boîtes d'Alice et Bob peut déterminer si la boîte mesure l'énergie ou si elle mesure l'âge des photons, mais ce n'est pas encore suffisant pour jouer au jeu de Bell, car dans ce jeu les boîtes doivent produire des résultats binaires. Or les mesures d'énergie ou d'âge produisent des résultats numériques qui peuvent prendre un très grand nombre de valeurs possibles (nombre en principe infini). Il nous faut donc « discrétiser » l'intrication.

Commençons par remplacer le laser qui illumine en continu le cristal non linéaire par un laser qui produit une brève impulsion lumineuse. Séparons cette impulsion en deux à l'aide d'un miroir semi-transparent et, après avoir retardé une des deux demi-impulsions, recombinaisons-les comme illustré sur la figure 6. Ainsi, le cristal est illuminé par une succession de deux demi-impulsions. Il s'agit toujours du même cristal non linéaire qui peut produire des paires de photons. Quand ces paires de photons seront-elles produites ? Chaque photon vert du laser est séparé en deux, une moitié retardée, puis envoyée sur le cristal. Ainsi, chaque photon vert peut se transformer dans le cristal non linéaire en deux photons infrarouges à deux moments différents. Si l'on détecte l'un des photons infrarouges, on peut le trouver à deux temps différents, soit « à l'heure », soit « en retard ». Et l'autre photon infrarouge sera forcément au même temps (aura le même âge). Nous voici donc avec un résultat binaire pour la mesure de l'âge des photons infrarouges. (Il faut bien comprendre que le photon vert n'est pas parfois à l'heure et parfois en retard, mais toujours à la fois à l'heure et en retard – en « superposition », dirait un physicien. Son « nuage » d'âges potentiels a deux pics, l'un correspondant à « à l'heure », l'autre à « en retard ». Chaque paire de photons infrarouges produite par un photon vert est également à la fois à l'heure et en retard, mais les deux photons ont toujours le même âge.)

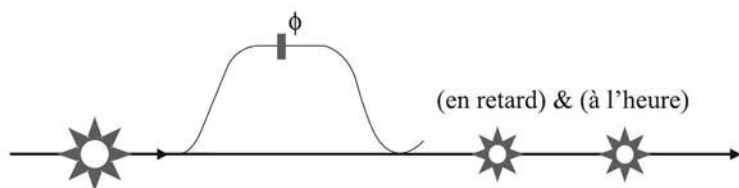


Figure 6. Illustration d'un bit quantique (qubit) codé en temps (*time-bin*). À gauche, on voit un photon incident. Ce photon peut prendre le chemin court (en bas sur la figure) ou le chemin long (en haut). Ces deux chemins sont ensuite recombinaisonnés. Ainsi, le photon peut se trouver « à l'heure » (s'il a pris le chemin court), ou « en retard » (s'il a pris le chemin long). Selon la physique quantique, le photon peut en fait prendre à la fois le chemin court et le chemin long. Il se retrouve donc à la fois « à l'heure » et « en retard » (en superposition, comme disent les physiciens).

La deuxième mesure nécessaire, celle d'énergie, pour jouer au jeu de Bell requiert un interféromètre. L'important est de comprendre qu'on peut ainsi aussi discrétiser la mesure d'énergie⁴ et jouer et gagner au jeu de Bell.

L'expérience Bernex-Bellevue

Nous avons réalisé cette expérience à Genève en 1997. C'était la première fois qu'on jouait au jeu de Bell en dehors d'un laboratoire de physique. Je connaissais bien les télécommunications classiques, en particulier les fibres optiques, ayant contribué à leur introduction en Suisse au début des années 1980. La difficulté technique majeure était de pouvoir détecter un par un des photons à la longueur d'onde compatible avec les fibres optiques. À l'époque, de tels détecteurs n'existaient pas. Lors de nos premiers essais nous trempions des diodes dans l'azote liquide (pour les maintenir à basse température)... Une difficulté d'un autre genre consistait à avoir accès au réseau de fibre optique de Swisscom, notre opérateur national. Heureusement, grâce à mes travaux en télécommunication, j'avais d'excellents contacts.

Le cristal source d'intrication, avec tout l'équipement qui l'accompagne, a pu être transporté et installé dans un centre de télécom important proche de la gare de Cornavin. De là, une fibre optique ininterrompue file jusqu'au village de Bellevue, au nord de Genève, et une autre jusqu'à Bernex, un village au sud de Genève, distant de plus de 10 kilomètres à vol d'oiseau de Bellevue. Dans chacun de ces villages, nous avons pu installer nos interféromètres et détecteurs de photons (avec azote liquide !) dans de petits centraux télécom. L'accès à ces centraux nécessite évidemment une clé. Puis, dans la minute qui suit l'ouverture de la porte, on doit contacter une centrale d'alarme à l'aide d'un interphone dédié et donner un mot de passe. Puis on descend au quatrième sous-sol, là où les fibres optiques arrivent de toute la région. Comme il est impossible d'y utiliser un téléphone mobile, je vous laisse imaginer les problèmes de logistique.

Commence l'expérience. Nous nous attendions à gagner au jeu de Bell. Mais trois surprises nous attendaient. Première surprise : lorsque le soleil se lève, la fibre filant au sud s'allonge nettement plus que l'autre. Pourtant, elles sont sensiblement de la même longueur. L'explication probable est que cette fibre passe sur un pont : moins profondément enterrée que l'autre, elle subit donc davantage de variations de température. Cela a posé un difficile problème de synchronisation, que quelques nuits blanches ont permis de régler. La deuxième surprise fut particulièrement agréable. Mme Mary Bell, la veuve de John Bell, est venue nous rendre visite. Finalement, après publication de notre expérience⁵, nous avons eu encore droit à une troisième surprise sous la forme d'un grand article dans le *New York Times*, d'une visite de la BBC pour filmer l'expérience, et d'une citation par l'Association américaine de physique, de notre expérience parmi les hauts faits des années 1990.

Chapitre 7

APPLICATIONS

Un concept physique pertinent a forcément des conséquences dans le monde de tous les jours. Les équations de l'électrodynamique que Maxwell a découvertes au XIX^e siècle ont façonné une grande partie de l'électronique du XX^e siècle. De même, on doit s'attendre à ce que la physique quantique découverte au XX^e siècle façonne la technologie du XXI^e siècle. Cette physique quantique nous a déjà donné les lasers (des lecteurs DVD, entre autres) et les semi-conducteurs des ordinateurs. Mais ces premières applications n'utilisent que des propriétés d'ensembles de particules quantiques, ensembles de photons pour les lasers et ensembles d'électrons pour les semi-conducteurs. Qu'en est-il des corrélations quantiques non locales ? Celles-ci font intervenir des particules par paires, une pour Alice l'autre pour Bob ; il faut donc maîtriser ces particules individuellement. C'est là un sacré défi ! Mais les physiciens ne reculeront pas. Ce chapitre présente deux applications d'ores et déjà commerciales, mais il est fort probable que beaucoup d'autres applications merveilleuses attendent d'être découvertes.

Génération de nombres aléatoires au vrai hasard

La première application est très simple. Nous avons vu que des corrélations non locales ne sont possibles que si les résultats chez Alice sont dus au vrai hasard. Mais le hasard, ça sert à quoi ? Rien de plus utile dans notre société de l'information. Nous avons tous des cartes de crédit et d'innombrables mots de passe. Nos cartes de crédit possèdent un code PIN, qui doit être secret, c'est-à-dire choisi au hasard. Or il n'est pas simple de fabriquer du hasard. Plus haut, nous avons aussi vu l'importance des nombres aléatoires en simulation numérique. Un autre exemple qui se développe rapidement découle des jeux en ligne sur Internet. Là aussi, il faut s'assurer que les tirages au sort des cartes virtuelles et autres numéros gagnants, soient bien le fruit d'un hasard. Sinon, soit le casino électronique triche, soit, si le casino utilise des nombres pseudo-aléatoires, un petit malin peut trouver la séquence et mettre le casino à genoux. Donc, utiliser le vrai hasard quantique, le seul vrai hasard connu en physique, pour développer un générateur de nombres aléatoires, est une application prometteuse de la physique quantique.

La physique appliquée consiste à comprendre suffisamment la physique pour pouvoir simplifier un protocole jusqu'au point où il soit réalisable de façon économiquement viable. Utiliser deux ordinateurs, Alice et Bob, séparés d'une distance du genre espace, c'est-à-dire incapables de s'influencer à la vitesse de la lumière, qui gagnent au jeu de Bell, est beaucoup trop compliqué pour une application commerciale. Si on ne regarde qu'Alice, on voit qu'essentiellement elle a des photons qui passent par un miroir semi-transparent avant de rencontrer deux détecteurs de photons. La présence d'intrication et de Bob permet de gagner au jeu de Bell de façon à garantir que le résultat d'Alice est dû au vrai hasard, mais en fin de compte, on n'a besoin que du résultat d'Alice ; il suffit donc que Bob soit virtuellement possible. Donc, pour l'application, oublions Bob. Une fois ce pas franchi, l'intrication n'est plus nécessaire, il suffit que le photon d'Alice puisse en principe être intriqué ; en pratique, il n'a pas besoin

de l'être. Finalement, plutôt qu'un photon unique, Alice peut utiliser une source laser très fortement atténuée, de sorte qu'il n'y ait pratiquement jamais plus d'un photon. C'est ainsi que fonctionne la majorité des générateurs de nombres aléatoires d'origine quantique qu'on trouve dans le commerce, appelés QRNG pour *quantum random number generator*. Si l'on regarde la figure 7 qui présente le QRNG de la société genevoise ID Quantique SA¹, on peut se dire que c'est trop simple : où donc sont passées les corrélations non locales ? Ce générateur ne les utilise pas directement, mais c'est la possibilité d'utiliser le même type de photons, de séparateurs et de détecteurs de photons pour produire des corrélations non locales qui garantit que les résultats sont bien au hasard.

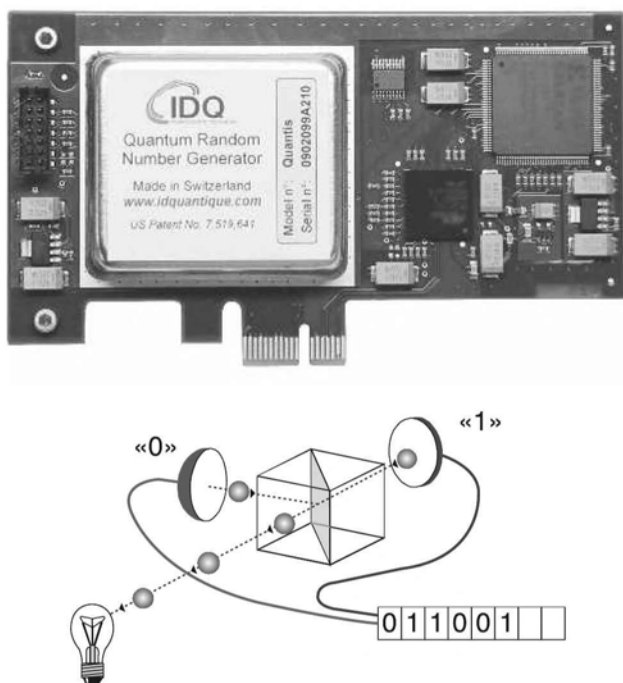


Figure 7. Générateur de nombres aléatoires quantiques. Le principe est illustré sur le schéma : un photon arrive sur un miroir semi-transparent suivi de deux détecteurs. Chaque détecteur est associé à un nombre binaire (un bit). Au-dessus, on voit le premier générateur commercial, dû à la société genevoise ID Quantique (3 × 4 cm).

Certains sont peut-être suspicieux et se demandent comment être sûr qu'il s'agit bien du même type de séparateurs et de détecteurs ? Ils ont raison : pour simplifier ce générateur de nombres aléatoires et le rendre commercialement viable, il nous a fallu introduire l'hypothèse que les dispositifs sont fiables. Cette hypothèse est très courante et bien éprouvée. Il y a une manière forte élégante de s'en affranchir, mais alors il faut revenir beaucoup plus proche du jeu de Bell et renoncer à la plupart des simplifications présentées ci-dessus. Cela a été réalisé expérimentalement, mais en laboratoire uniquement².

La cryptographie quantique QKD : le principe

Une deuxième application est la cryptographie quantique. Nous avons vu que si deux objets sont intriqués, ils produisent toujours le même résultat si l'on fait la même mesure sur chacun d'eux. À première vue cela ne semble pas très utile, surtout que ces résultats identiques sont produits au hasard. Mais, aux yeux d'un cryptographe, c'est extrêmement intéressant. En effet, notre société de l'information échange d'énormes quantités d'information, dont une grande partie doit rester confidentielle. Pour cela, on encode l'information avant de l'envoyer au destinataire. Ainsi, aux yeux d'une tierce personne, cette information codée ressemble à un simple bruit sans aucune structure ni signification. Mais, sur le long terme, il est impératif de changer de code très fréquemment, idéalement à chaque nouveau message. Cela pose le problème de l'échange des clés de codage. Ces clés doivent être connues de l'émetteur et du récepteur, mais de personne d'autre. On pourrait imaginer des armées de chauffeurs de taxis blindés sillonnant la planète pour distribuer ces clés aux usagers. Mais peut-on faire plus simple ?

Aujourd'hui, certains gouvernements et grandes sociétés envoient effectivement des personnes avec une mallette attachée à leur poignet pour distribuer des clés de codage aux partenaires avec lesquels ils estiment devoir communiquer de façon ultraconfiden-

tielle. Le commun des mortels se contente (pour faire des achats sur Internet par exemple) d'un système plus pratique dont la sécurité est basée sur la théorie mathématique de la complexité. Cela s'appelle un système de cryptographie à clé publique. L'idée est que certaines opérations mathématiques, comme multiplier deux grands nombres premiers, sont faciles à réaliser avec un ordinateur mais très difficiles à inverser : ici, il s'agirait de retrouver les deux nombres premiers à partir de leur produit.

Peu importe ici le détail, l'important est de comprendre ce que signifie « difficile ». Pour un collégien, un problème est difficile si même les bons élèves n'arrivent pas à le résoudre. En cryptographie à clé publique, c'est la même chose, sauf qu'au lieu de collégiens on prend les meilleurs mathématiciens du monde ; on les rassemble dans un endroit très confortable et on leur promet une belle récompense s'ils trouvent la solution du problème. Si aucun ne trouve, c'est que le problème est vraiment difficile. Difficile, oui, sans aucun doute, mais pas forcément impossible. L'histoire des mathématiques est pleine d'exemples de problèmes sur lesquels les meilleurs mathématiciens ont buté pendant des années, parfois des siècles, avant qu'un petit malin n'en trouve la solution.

Les mathématiques sont ainsi faites qu'une fois une solution connue il n'est pas difficile de la reproduire et de l'utiliser. Si donc un jour, demain par exemple, un petit génie découvrait comment trouver les deux nombres premiers qui se cachent derrière leur produit, tout l'argent électronique de notre société perdrait instantanément sa valeur. Plus de cartes de crédit, plus de commerce en ligne et plus de prêts interbancaires. Une véritable catastrophe. De plus, si une organisation avait enregistré des communications cryptées par clé publique, elle pourrait après coup les déchiffrer, et lire des messages confidentiels envoyés des années, voire des décennies auparavant. Donc, si vous voulez que vos informations restent confidentielles pour des décennies, mieux vaut renoncer dès aujourd'hui à la cryptographie par clé publique.

Voilà où le fait de trouver des résultats au hasard, mais identiques chez Alice et Bob, prend toute son importance. Si Alice et Bob partagent de l'intrication, ils peuvent produire à tout moment

une suite de résultats qu'ils peuvent immédiatement utiliser comme clé de codage. Et grâce au théorème de non-clonage, ils peuvent être certains qu'aucune autre personne ne possédera jamais une copie de leur clé. C'est aussi simple que cela, du moins sur le papier.

La cryptographie quantique QKD : la pratique

À l'intention des esprits curieux, voici comment on procède pratiquement pour simplifier le dispositif du jeu de Bell. À nouveau, nous verrons comme il est important de bien comprendre l'essentiel des principes physiques en jeu afin de simplifier la mise en pratique de la cryptographie quantique autant que possible, mais pas davantage.

Première simplification. Dans les réalisations expérimentales du jeu de Bell, il y a trois parties : Alice, Bob, et le cristal produisant les photons intriqués. Par souci de symétrie, ce dernier est généralement situé au milieu. Mais ce n'est pas pratique, alors mettons-le chez Alice. Ainsi, on n'a plus que deux entités. En faisant cela, on perd l'interdiction de communication entre Alice et Bob imposée par la relativité. Mais, en cryptographie, il faut de toute façon s'assurer qu'aucune information ne sort involontairement ni de chez Alice ni de chez Bob, sans quoi il n'y aurait plus de confidentialité.

Deuxième simplification. Maintenant que la source de paires de photons intriqués est chez Alice, Alice mesure le qubit porté par son photon bien avant Bob. En fait, elle le mesure avant même que l'autre photon ait quitté Alice pour s'en aller vers Bob. Donc, plutôt que d'utiliser une source de paires de photons et d'en mesurer immédiatement un (et donc de le détruire), il est bien plus simple pour Alice de directement utiliser une source qui produit des photons un à un.

Troisième simplification. Une source qui produit des photons un à un est compliquée. Bien plus simple est d'utiliser une source qui produit des impulsions laser extrêmement faibles, si faibles

qu'une impulsion ne contient que très rarement plusieurs photons. Voilà une source fiable, bien éprouvée et bon marché. Il ne reste plus qu'à savoir que faire des rares cas d'impulsions multiphotons. En fait, il suffit de connaître assez précisément la fréquence de ces impulsions multiphotons. Puis on suppose de façon très conservative que l'espion connaît tout de ces impulsions multiphotons. Après l'échange de très nombreuses impulsions, typiquement des millions, Alice et Bob savent combien au pire leur adversaire possède d'informations sur leurs résultats. Ils peuvent alors utiliser un algorithme classique dit d'amplification de la confidentialité³, qui permet d'extraire d'une clé dont on sait qu'un adversaire connaît au maximum une petite fraction, une clé un peu plus courte, mais dont on peut être certain qu'elle est absolument sûre⁴.

En fin de compte, il n'y a plus que deux boîtes ; l'une envoie des impulsions laser de très faible intensité qui portent une information quantique codée en polarisation, ou en temps comme décrit au chapitre 6, et l'autre mesure la polarisation ou les âges de ces photons. En pratique, il y a bien sûr encore d'autres astuces technologiques, mais si vous m'avez suivi jusqu'ici, vous avez compris un beau morceau de physique appliquée⁵.

Aujourd'hui, certaines organisations genevoises ayant leur système de copies de sauvegarde près de Lausanne, à 70 kilomètres, utilisent des systèmes commerciaux de cryptographie de la compagnie genevoise IDQ, *spin-off* de l'Université de Genève, *via* des fibres optiques passant sous le lac Léman.

Historiquement, il est intéressant de constater que la version simplifiée ci-dessus a été inventée bien avant celle basée sur la non-localité. Mystère de l'histoire – humaine, trop humaine – qui ne suit pas forcément un cours logique... Autre petite histoire bien humaine : quand Bennett et Brassard ont inventé la cryptographie quantique, version simplifiée, aucun journal de physique n'a voulu la publier. Trop nouveau ! trop original ! Donc incompréhensible pour les physiciens qui ont dû évaluer ce travail avant publication. Finalement, Bennett et Brassard ont publié leur résultat dans les comptes rendus d'une conférence

d'informatique tenue en Inde ! Inutile d'ajouter que cette publication de 1984 est passée inaperçue jusqu'à la redécouverte indépendante de la cryptographie quantique par Artur Ekert en 1991, découverte cette fois basée sur la non-localité et publiée dans un prestigieux journal de physique.

Chapitre 8

LA TÉLÉPORTATION QUANTIQUE

Qu'y a-t-il de plus étonnant que la téléportation ? Un objet qui disparaît ici pour réapparaître là-bas sans être passé par aucun lieu intermédiaire ! ? Les technologies des communications font parfois penser à de la téléportation : un e-mail quitte mon ordinateur pour se retrouver en quelques secondes sur l'écran de mon ami, là-bas à l'autre bout du monde. Mais pour un e-mail, on sait bien que tout un réseau d'onde wi-fi, d'électrons dans des câbles en cuivre et de photons dans des fibres optiques a, de fait, porté mon e-mail de proche en proche d'ici jusqu'à là-bas. Pour la téléportation, rien de tel : l'objet « saute » d'ici à là-bas sans passer par aucun lieu intermédiaire. Cela tient de la magie, de la science-fiction... à moins que la non-localité quantique, ce lien d'apparence magique entre lieux distants, ne puisse être mise à profit.

Tout au long de ce livre, nous avons vu que la non-localité ne permet pas la communication. Or la téléportation de science-fiction permet de communiquer à une vitesse arbitraire. De plus, un objet est forcément constitué de matière (ou d'énergie s'il s'agit d'un photon) et la matière ne peut passer d'un endroit à un autre sans passer par des lieux intermédiaires. La téléportation de science-fiction est donc impossible. Pourtant, en 1993, un groupe de physiciens, qui s'amusaient, lors d'une petite session de brainstorming, à jouer avec le concept de non-localité, a inventé la téléportation quantique¹. La publication a six cosignataires : personne n'a donc inventé seul la téléportation quantique, c'est réellement

le fruit d'un ping-pong cérébral, un mode de fonctionnement bien éloigné de l'image du savant isolé et génial².

Substance et forme

Alors, comment marche la téléportation ? Tout d'abord, il nous faut revenir sur le concept d'objet. Aristote avait déjà proposé de considérer un objet comme constitué de deux ingrédients : la substance et la forme³. Aujourd'hui, les physiciens diraient la matière et l'état physique. Par exemple, une lettre est constituée de papier et d'encre d'une part, qui sont la matière, et d'un texte qui est l'information ou l'état physique du papier et de l'encre. Pour un électron, la substance est sa masse et sa charge électrique (ainsi que d'autres attributs permanents), tandis que ses nuages de positions et de vitesses potentielles constituent son état physique. Pour un photon, particule de lumière sans masse, la substance est son énergie et son état physique est constitué par sa polarisation et par ses nuages de positions et ses fréquences de vibration potentielles.

En téléportation quantique, on ne téléporte pas tout l'objet, mais seulement son état quantique, donc sa « forme », dirait Aristote. Est-ce décevant ? Bien sûr que non ! D'abord, parce qu'il est évident qu'on ne pourra jamais téléporter la masse ou l'énergie d'un objet : cela violerait gravement le principe d'impossibilité de communication sans transmission (voir l'encadré 5, p. 45). Ensuite, le fait qu'on puisse téléporter l'état quantique d'un objet est extraordinaire. En effet, l'état quantique est la structure ultime de la matière ; on ne téléporte donc pas simplement une description approximative, mais *tout* ce qu'il y a à téléporter. Et rappelez-vous le théorème de non-clonage du chapitre 4. Quand on téléporte l'état quantique d'un objet, l'original doit nécessairement disparaître, sinon on aboutirait à deux copies, ce qui contredirait le théorème de non-clonage. On a donc bel et bien disparition de l'original ici et apparition de l'état téléporté là-bas.

Résumons. En téléportation quantique, la substance (masse, énergie) de l'objet initial demeure au lieu de départ, disons chez Alice, mais toute sa structure (son état physique) s'évapore. Par exemple, si Alice téléporte un canard sculpté dans de la pâte à modeler, la pâte demeure sur place, mais la forme disparaît : il ne reste qu'une pâte informe. À l'arrivée, disons chez Bob, à une distance en principe arbitraire (et en un lieu qui peut être inconnu d'Alice), une pâte informe (la substance) est initialement présente. À la fin du processus de téléportation, la pâte de Bob acquiert l'exacte forme du canard initial, exacte jusqu'au moindre détail atomique. Cet exemple est encore du domaine de la science-fiction car, aujourd'hui, on ne sait pas téléporter un canard en pâte à modeler – objet beaucoup trop complexe pour notre technologie. Peut-être même la physique quantique ne s'applique-t-elle pas à cette échelle d'objets usuels ? Considérons donc un deuxième exemple, à la fois plus réaliste et plus abstrait : la polarisation d'un photon.

Un photon est un tout petit paquet d'énergie lumineuse (les physiciens parlent d'énergie électromagnétique). Cette énergie est constituée, entre autres, d'un faible champ électrique qui vibre. Si le photon a une polarisation bien structurée, le champ électrique vibre de façon régulière dans une direction bien précise. Par contre, si le même photon a une polarisation sans structure (les physiciens parlent de photons dépolarisés⁴), ce champ électrique vibre dans tous les sens, de façon totalement désordonnée.

Initialement, le photon d'Alice a une polarisation bien structurée : le photon vibre selon une direction bien précise. Cette direction peut être inconnue, mais elle existe. Après le processus de téléportation, l'énergie du photon d'Alice est toujours là, mais il est dépolarisé. Du côté du récepteur, Bob, il y a initialement un photon (donc de l'énergie⁵) dépolarisé qui, au terme du processus de téléportation, a acquis la polarisation bien structurée du photon téléporté. Le photon de Bob est désormais en tout point identique au photon initial d'Alice, et le photon d'Alice est en tout point identique au photon initial de Bob⁶.

Il s'agit donc bien de téléportation : le photon considéré comme « énergie + polarisation », ou plus généralement un objet considéré comme « substance + état physique », passe bien d'Alice à Bob sans passer par aucun lieu intermédiaire. Après le processus de téléportation quantique, rien ne distingue la situation finale du cas où l'on aurait transporté le photon d'Alice jusqu'à Bob et, inversement, le photon de Bob jusqu'à Alice.

Tout cela ne nous dit toujours pas comment fonctionne la téléportation quantique. On a compris qu'il faudra exploiter la non-localité quantique. Mais cela ne suffit pas, il nous faut encore un autre concept, celui de « mesure jointe ».

Mesure jointe

Pour réaliser une téléportation, il nous faut donc une paire d'objets quantiques intriqués. Pour être un peu concrets, imaginons une paire de photons intriqués en polarisation. Puis, il nous faut un objet à téléporter, mettons un photon dont on veut téléporter la polarisation. L'état de polarisation est donc le bit d'information quantique (le qubit) à téléporter. Alice, l'émettrice, a à disposition, d'une part le photon à téléporter, ou plus précisément le photon portant le qubit en polarisation à téléporter, et d'autre part un photon qu'elle sait être intriqué avec un troisième photon en possession de Bob, quelque part très loin. Alice n'a pas besoin de savoir où est Bob. Que peut-elle faire ? Si elle mesure le qubit à téléporter, elle va le perturber et ne pourra donc plus téléporter l'original. Si elle mesure le photon intriqué avec celui de Bob, elle sait qu'elle peut produire une corrélation non locale avec Bob, mais qu'en ferait-elle ? Tout ce qu'elle sait est que si Bob fait la même mesure qu'elle, ils obtiennent tous deux le même résultat : un résultat au hasard, mais le même des deux côtés.

Le cœur du processus de téléportation est pour Alice d'exploiter un deuxième aspect de l'intrication, un aspect encore mal connu. Jusqu'ici, nous n'avons vu que le premier aspect de l'intrication, celui qui permet à deux objets quantiques distants, par exemple

deux photons, d'être décrits par un état intriqué. Mais, ici, Alice est en possession de deux photons qui sont décrits par deux états : le premier est dans un état de polarisation bien précis (mais qui peut être inconnu d'Alice) et le second est dans un état intriqué. Ce qu'Alice doit faire est d'intriquer ses deux photons. Pour cela, elle ne doit pas mesurer l'un ou l'autre, mais les mesurer conjointement. C'est difficile à comprendre car, comme pour l'intrication, c'est quelque chose d'impossible à réaliser dans le monde qui nous est directement accessible.

Pour comprendre, imaginons qu'Alice pose à ses deux photons la question suivante : « Êtes-vous semblables ? » Par là, Alice demande aux photons : « Si je faisais la même mesure sur chacun d'entre vous, produiriez-vous tous deux la même réponse ? » Dans le monde des objets usuels, la seule façon de répondre à cette drôle de question est d'effectuer les deux mesures et de comparer les deux résultats. Mais, en physique quantique, on peut faire mieux grâce à l'intrication. On peut « poser » cette question aux deux photons qui répondent en se mettant ensemble dans un état d'intrication et cela sans devoir effectuer deux mesures sur chacun d'entre eux. Nous savons déjà qu'un état d'intrication est tel que si on mesure les deux photons de la même manière (dans la même direction comme discuté au chapitre 5), alors ils produiront toujours le même résultat, au hasard, le fameux vrai hasard non local. Et cela quelle que soit la direction de mesure choisie !

Si les deux photons d'Alice produisent toujours la même réponse pour la même question, et que le photon de Bob intriqué avec celui d'Alice produit lui aussi le même résultat pour la même question, alors le photon de Bob produit toujours la même réponse qu'aurait produite le photon à téléporter. C'est – presque – aussi simple que cela. Il faut donc utiliser l'intrication deux fois : une fois comme canal de téléportation quantique non local (l'état intriqué des photons d'Alice et Bob) et une deuxième fois pour permettre de poser à deux systèmes (les deux photons d'Alice) une question concernant leur état relatif, sans obtenir aucune information sur l'état de chacun d'eux (voir figure 8).

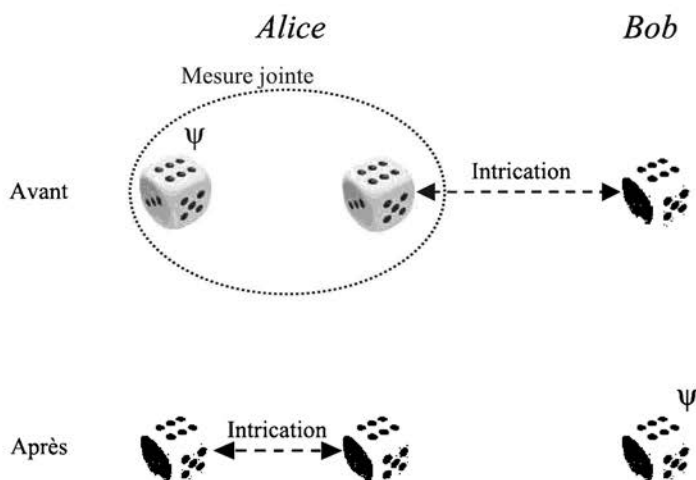


Figure 8. Schéma de la téléportation quantique. Initialement, Alice a deux photons, représentés par deux dés. Celui de gauche porte le bit quantique à téléporter (qubit, noté Ψ), celui de droite est intriqué avec le photon de Bob. Alice effectue une mesure jointe sur ses deux photons. Cette opération intrique ses deux photons et simultanément téléporte le qubit de gauche sur le photon de Bob. Pour terminer le processus, Alice communique à Bob le résultat de sa mesure jointe et Bob « tourne » son photon en fonction de ce résultat.

Mais on n'y est pas encore tout à fait. La mesure conjointe des deux photons d'Alice, celle concernant leur état relatif, produit, comme toujours en physique quantique, un résultat au vrai hasard parmi plusieurs résultats possibles. Si on a de la chance et qu'on obtient le résultat « nous sommes semblables », c'est apparemment terminé. Sauf que Bob ne le sait pas. Et que se passerait-il si Alice obtenait le résultat « nous sommes dissemblables », c'est-à-dire « à la même question, nous produirions des résultats opposés » ? Dans ce cas, Bob devrait retourner son photon afin qu'il soit dans un état prêt à également produire le même résultat que le photon initial d'Alice⁷.

Comment Alice fait-elle pour interroger ses deux photons ? C'est la difficulté expérimentale principale. Je n'en dirai pas davantage car cela sort nettement du cadre de ce livre...

Protocole de téléportation quantique

La mesure conjointe d'Alice produit donc un résultat au hasard. Suivant ce résultat, le photon de Bob produira toujours le résultat qu'aurait produit le photon initial si on l'avait mesuré selon la même direction, ou bien le résultat opposé à celui qu'aurait produit le photon initial. Et ces deux possibilités sont équiprobables. Jusqu'ici, pour Bob, ce n'est vraiment pas très intéressant : avec une chance sur deux, il obtient le même résultat que le photon original aurait produit, et avec une chance sur deux il obtient le résultat opposé. Pour arriver à cela, Bob n'avait besoin de rien du tout. Comme il n'y a que deux résultats possibles, il savait d'avance qu'il avait une chance sur deux de trouver le bon résultat. Mais en téléportation quantique, Alice, elle, sait quel est le résultat de sa mesure jointe, donc elle sait si Bob trouve le bon résultat ou s'il trouve le résultat opposé. Pour terminer le processus de téléportation quantique, Alice doit donc communiquer à Bob dans quel cas il se trouve.

On comprend maintenant comment la téléportation quantique évite la communication à une vitesse arbitraire : le processus n'est terminé qu'après que Bob a reçu le résultat de la mesure jointe qui intrique les deux photons d'Alice. Cette communication d'Alice à Bob est nécessaire, car sans elle les résultats de Bob sont simplement au hasard, et Bob ne peut pas les interpréter ; cette communication du résultat d'Alice se propage forcément à la vitesse de la lumière, ou plus lentement. Donc la téléportation quantique, dans son ensemble, ne va pas plus vite que la lumière. Il se passe bien quelque chose chez Bob quand Alice fait sa mesure jointe, puisque le photon de Bob passe d'un état sans aucune structure à l'un des deux états possibles. Bob ne peut pas s'en rendre compte car quelle que soit la mesure qu'il effectue, il obtiendra un résultat au hasard, mais dès qu'Alice lui apprend dans lequel des deux états se trouve son photon, Bob sait comment faire pour toujours obtenir le résultat qu'aurait obtenu Alice si elle avait mesuré son photon initial – et ce quelle que soit la mesure choisie par Bob. Le photon de Bob porte donc l'état quantique du photon initial.

Notons que Bob n'est pas obligé de mesurer son photon. Il peut le garder en l'état pour un usage futur ou même le téléporter à son tour plus loin. On peut ainsi imaginer un jour tout un réseau de téléportation de proche en proche (disons de 50 kilomètres en 50 kilomètres, une distance sur laquelle l'intrication se propage facilement par fibre optique). Si Bob apprend d'Alice que son photon produirait toujours le résultat opposé, il lui suffit de renverser son photon⁸. Cela peut être fait sans perturber le photon (Bob retourne son photon sans rien apprendre sur son état). Notez que Bob peut tout aussi bien téléporter plus loin son photon sans le rectifier ; il lui suffit d'informer le destinataire final qu'il devra effectuer lui-même la rectification. Ainsi, le destinataire final calculera combien de fois il doit retourner son photon : s'il s'agit d'un nombre pair, il n'y a rien à faire, si c'est un nombre impair, il retourne son photon.

Encore une précision importante. Ni Alice ni Bob n'apprennent quoi que ce soit sur l'état téléporté. En effet, le résultat de la mesure jointe qu'Alice effectue sur ses deux photons est toujours totalement aléatoire. Ce résultat ne fournit donc aucune information sur l'état téléporté. Si on y réfléchit bien, cela n'est pas surprenant. Nous avons vu qu'en partant d'un état intriqué, le résultat d'une mesure selon n'importe quelle direction est toujours totalement aléatoire, au vrai hasard. Réciproquement, si l'on part d'un photon qui vibre selon une direction bien déterminée, quelle que soit cette direction, et qu'on le soumet à la question « êtes-vous semblables ? », le résultat est également totalement aléatoire, à nouveau au vrai hasard. C'est, en quelque sorte, le processus inverse. Et, si l'on poursuit notre réflexion, cela est nécessaire, sinon, si Alice et/ou Bob apprenaient quelque chose de l'état téléporté, ils pourraient répéter le processus en téléportant cet état alternativement de l'un à l'autre, en utilisant chaque fois une nouvelle paire de photons intriqués, jusqu'à ce qu'ils aient accumulé suffisamment d'information pour pouvoir produire des copies de cet état, ce qui contredirait le théorème de non-clonage du chapitre 4.

Finalement, Alice et Bob peuvent également téléporter l'état d'un photon lui-même intriqué avec un quatrième photon :

puisqu'ils n'apprennent rien de l'état téléporté, ils ne brisent pas l'intrication téléportée. Ainsi, on exploite les deux aspects de l'intrication, deux fois pour corrélérer des photons à distance et une fois pour effectuer une mesure jointe. On peut donc intriquer des photons qui ne se sont jamais vus, qui n'ont aucun passé en commun, comme illustré sur la figure 9 ! On parle alors de téléportation d'intrication.

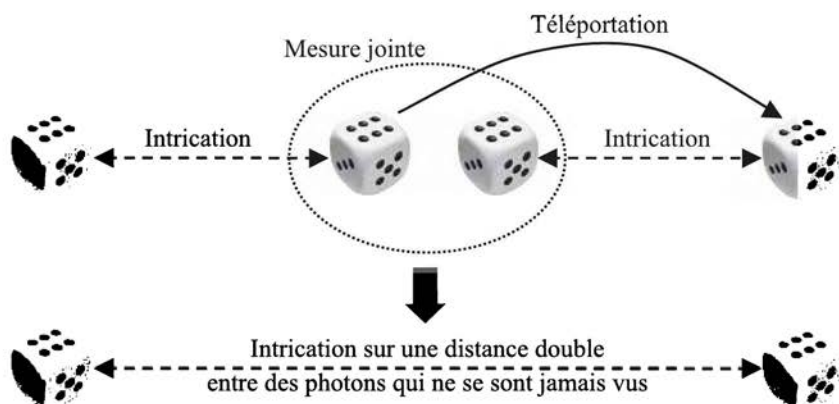


Figure 9. Lorsqu'on téléporte un qubit (photon) lui-même intriqué, comme ici le deuxième depuis la gauche qui est intriqué avec le premier, le résultat est que le premier est intriqué avec le quatrième. On parle de téléportation d'intrication. Ce processus est fascinant, car il intrique des particules qui ne se sont jamais rencontrées. Il est également utile car il permet de doubler la distance entre les objets intriqués.

Fax quantique et réseaux de communication quantique

Il pourrait sembler, finalement, que la téléportation quantique n'est rien d'autre qu'un fax quantique. Après tout, Bob doit déjà être en possession d'un qubit, qui fait office de feuille blanche sur laquelle, à la fin du processus, s'inscrit l'état du qubit « faxé ». Mais cette analogie est trompeuse pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, dans la téléportation, on ne faxe pas simplement une quelconque information : c'est l'état ultime, donc la structure ultime de la matière qui est téléportée. Non seulement le qubit final porte l'état du qubit initial, mais il lui est en tout point identique.

Ensuite, la description de l'état d'un système quantique requiert une quantité d'information infinie, car il existe une infinité d'états quantiques. Par exemple, l'état de polarisation d'un photon peut être décrit par un angle. Pour communiquer cet angle, il faut un nombre infini de bits de communication. Alors que, dans la téléportation quantique, l'état de polarisation d'un photon ne requiert qu'un seul bit. Donc, la communication nécessaire en téléportation quantique est infime par rapport à la quantité d'information qu'il faudrait pour communiquer l'état téléporté (si ce dernier était connu).

Troisième différence, dans la téléportation quantique, l'original est nécessairement détruit. Cela est nécessaire pour satisfaire au théorème de non-clonage que nous avons vu au chapitre 4.

Finalement, la différence majeure. En téléportation quantique, ni Alice ni Bob n'apprennent quoi que ce soit sur l'état du qubit téléporté. Cela est absolument remarquable et très utile en cryptographie. Si quelqu'un envoie un fax, n'importe qui le long de la ligne de télécommunication peut en prendre connaissance. En téléportation quantique, rien de tout cela : comme nous l'avons vu, personne n'apprend rien sur l'état du qubit téléporté, même pas l'émetteur et le récepteur. Ainsi, Alice peut téléporter un message à Charles, qui à son tour le téléporte à Bob. Si Charles effectue correctement le protocole de téléportation quantique, il n'apprend rien du message. Alice et Bob peuvent même vérifier que le pro-

cessus s'est bien passé et que Charles n'a rien appris en appliquant le protocole de cryptographie quantique. En généralisant à tout un réseau de téléportation quantique, Alice et Bob peuvent s'assurer de la confidentialité de leur communication même si celle-ci utilise des nœuds intermédiaires (des « répéteurs quantiques », comme disent les physiciens).

Peut-on téléporter de grands objets ?

Êtes-vous prêt à entrer dans une machine de téléportation quantique ? À votre place je me méfiera – pour deux raisons.

Tout d'abord, les rares expériences de téléportation quantique ont démontré le principe – et c'est merveilleux ! –, mais elles ont dû pour cela sélectionner les rares cas où l'objet initial n'a pas été perdu. En effet, la plupart de ces démonstrations expérimentales ont utilisé des photons et, tout comme pour les démonstrations du jeu de Bell (cf. « Échappatoire de détection », p. 113), beaucoup de photons sont tout simplement perdus. Les physiciens comprennent bien pourquoi et considèrent ces démonstrations comme conclusives. Toutefois, à la place des photons, si j'avais le choix, je ne serais pas volontaire pour une téléportation. Plus sérieusement, quelques démonstrations ont également été réalisées avec des atomes et dans ce cas, on n'en perd pratiquement aucun. Mais les distances en jeu sont, pour l'instant, inférieures au millimètre.

Il y a une deuxième raison de se méfier. Pour téléporter un objet de taille usuelle, il faudrait énormément d'intrication. Or l'intrication est extrêmement fragile. Pour la maintenir, il faut impérativement éviter toute perturbation, donc toute interaction avec l'environnement. On sait bien faire cela avec des photons qu'on isole dans des fibres optiques, ou avec quelques atomes dans des pièges particuliers sous haut vide. Mais pour l'énorme quantité d'intrication qu'il faudrait pour téléporter ne serait-ce que la pointe d'un crayon, il est aujourd'hui inimaginable d'éviter une perturbation qui rendrait le processus de téléportation totalement aléatoire.

Aujourd'hui, même avec un budget illimité, personne ne saurait comment surmonter cette difficulté. Il ne s'agit donc pas d'un simple problème technique. Peut-être un jour téléportera-t-on l'état quantique d'un virus ? On en est loin. Et encore faudrait-il savoir ce qu'est l'état quantique d'un virus. Peut-être aussi découvrira-t-on un jour que c'est impossible, et qu'un nouveau principe physique sera découvert interdisant la téléportation d'objet à notre échelle. Je n'en sais rien ; c'est l'incertitude et la beauté de la science !

Chapitre 9

LA NATURE EST-ELLE RÉELLEMENT NON LOCALE ?

À en juger d'après ce que nous avons vu jusqu'ici, il semble bien que la nature soit capable de produire des corrélations non locales. Mais les scientifiques n'ont pas pour habitude de se débarrasser d'une théorie ou d'un concept aussi facilement. Si une expérience donne des résultats étranges, ils questionnent non seulement la théorie, mais aussi l'expérience. Est-elle reproductible ? A-t-elle été correctement interprétée ? Dans notre cas, l'expérience a été reproduite maintes fois, sur tous les continents, avec toutes sortes de variantes. Pour autant, nous verrons qu'il est bien difficile d'être certain que toutes les issues ont bien été verrouillées, même si la communauté des physiciens est aujourd'hui intimement convaincue que la nature est effectivement non locale.

Dans ce chapitre, nous passerons en revue divers arguments que les scientifiques ont dû décortiquer pour se convaincre de renoncer à une description de la nature en termes de « morceaux de réalité » bien localisés et indépendants les uns des autres. L'image d'une nature sous forme d'une construction comme un jeu de Lego est en effet incompatible avec la non-localité telle que révélée par le jeu de Bell. Les lecteurs d'ores et déjà convaincus et qui ne souhaitent pas suivre le débat scientifique présenté ci-dessous peuvent sauter directement au chapitre 10.

La non-localité chez Newton

Commençons par un autre exemple de non-localité. Comme nous l'avons vu plus haut, ce n'est pas la première fois dans l'histoire que les physiciens rencontrent la non-localité. La gravitation universelle du grand Newton est également non locale. Selon cette théorie, si on déplace un caillou sur la Lune, notre poids sur Terre en est immédiatement affecté. Cet effet immédiat quelle que soit la distance est une action non locale. Contrairement à la non-localité quantique, cette action non locale permet une communication sans transmission à une vitesse arbitrairement grande. On peut légitimement se demander comment les physiciens ont pu accepter une telle théorie pendant des siècles. La réponse est qu'ils ne l'ont pas vraiment acceptée. La réaction de Newton lui-même est éloquente (encadré 1, p. 20) : « Que la gravité [...] puisse agir [...] à distance [...] est pour moi une si grande absurdité qu'à mon avis aucun homme ayant une faculté de réfléchir avec compétence aux problèmes philosophiques ne peut y tomber. »

Ce n'est qu'à partir de Laplace, quelques décennies plus tard, que certains ont élevé la théorie de Newton au statut de vérité ultime, et en ont conclu à un déterminisme absolu, identifiant science et déterminisme. L'attitude de Newton contraste fortement avec celle de Niels Bohr, le père spirituel de la mécanique quantique, qui a assommé une génération entière de physiciens avec son insistante affirmation que la théorie quantique est complète. Cela a amené Bohr à dénigrer les arguments qu'Einstein a très rapidement avancés pour montrer que la théorie quantique est non locale. Cela a peut-être empêché, aussi, qu'un jeune physicien des années 1930 trouve l'argument du jeu de Bell. Mais laissons là l'histoire-fiction et revenons à notre affaire.

Aujourd'hui, la non-localité de Newton a disparu des théories physiques. La relativité générale d'Einstein a remplacé la théorie de Newton qui n'a plus que le statut d'une excellente approximation. Selon la théorie actuelle, le déplacement d'un caillou sur la Lune n'affecte notre poids sur Terre qu'environ une seconde plus tard, le temps qu'un signal se propage à la vitesse de la lumière de la Lune à la Terre.

L'histoire de la non-localité de Newton est pertinente de deux points de vue différents. D'une part, ne se pourrait-il pas que la non-localité quantique ne soit également que temporaire et qu'une future théorie montrera que ces corrélations qui permettent de gagner au jeu de Bell s'expliquent localement dans l'espace et le temps, et que la théorie quantique n'est qu'une excellente approximation ? Mais non, comme on l'a vu, l'argument de Bell est indépendant de la théorie quantique, et cet argument permet de directement tester la non-localité. Si l'on gagne au jeu de Bell, alors la nature ne peut pas être entièrement décrite par une théorie locale, quelle que soit cette théorie.

D'autre part, il est fascinant de constater que la physique a quasiment toujours fourni une description non locale de la nature : non-localité de Newton jusqu'en 1915, et non-localité quantique depuis 1927. Ainsi, à l'exception d'une petite fenêtre de douze ans, la physique a toujours été non locale. On se demande pourquoi, aujourd'hui encore, tant de physiciens rechignent à accepter la non-localité. En revanche, il n'est pas surprenant qu'Einstein ait été parmi ses plus ardents opposants. Après tout, c'est lui qui, après des siècles, a enfin répondu à Newton en rendant la physique locale. Que dix ans plus tard une autre théorie permette à la non-localité de revenir au centre de la physique lui était viscéralement insupportable. Dommage que personne dans les années 1930 ou 1940 n'ait eu l'idée géniale de Bell : il aurait été passionnant de voir la réaction d'Einstein !

Échappatoire de détection

Dans le jeu de Bell, chaque fois que la manette est poussée vers la gauche ou vers la droite, les boîtes fournissent un résultat. Mais dans les expériences réelles, il arrive que le photon soit perdu¹ ou non détecté et qu'en conséquence aucun résultat ne puisse être enregistré. Les physiciens comprennent très bien pourquoi certains photons se perdent et pourquoi les détecteurs de photons n'ont qu'une efficacité limitée. Il n'en reste pas moins qu'il y a ici une différence entre le jeu théorique et l'expérience réelle.

En pratique, les physiciens ne regardent que les cas où les boîtes d'Alice et de Bob ont toutes deux produit un résultat ; ils ignorent tout simplement les autres cas. Ils supposent que l'échantillonnage ainsi obtenu est représentatif de l'ensemble, et justifient cette hypothèse en affirmant que la nature ne triche pas, qu'elle ne va pas leur présenter un échantillonnage biaisé. Ce raisonnement est cohérent, mais comme il y a là une hypothèse, il y a peut-être une échappatoire à la non-localité.

Imaginons que les boîtes d'Alice et Bob utilisent la stratégie suivante. À 9 h 00, chacune d'elles ne produit un résultat que si la manette est poussée vers la gauche (input 0) et dans ce cas les deux résultats sont 0. Si la manette d'une boîte est poussée vers la droite, la boîte ne produit aucun résultat. Puis, la minute suivante, elles ne produisent un résultat que si manette est poussée vers la droite (input 1), auquel cas les réponses seront 1 chez Alice et 0 chez Bob. Et ainsi de suite, à chaque minute chacune des deux boîtes n'accepte qu'une seule question et, le cas échéant produit un résultat prédéterminé. Si les deux boîtes se mettent d'accord à l'avance et si on ne considère que les cas où, par chance, les deux boîtes ont produit un résultat, alors le jeu de Bell peut être gagné à coup sûr, 4 fois sur 4 ! En effet, c'est comme si les boîtes connaissaient les questions à l'avance, puisqu'elles ne répondent qu'aux questions pour lesquelles elles sont prêtes (programmées) à répondre. Comme il y a deux choix possibles de questions, la probabilité de tomber, par chance, sur la bonne question est de 50 % pour chacune des deux boîtes. Donc, si dans une expérience la moitié des photons de chaque côté sont perdus ou non détectés, alors on peut facilement imaginer une stratégie qui permet de « gagner » au jeu de Bell bien plus souvent que 3 fois sur 4 : on peut même « gagner » à coup sûr ! J'ai écrit « gagner » entre guillemets car, bien sûr, on triche : les boîtes ne répondent pas toujours.

Est-il possible que des variables locales supplémentaires programment les photons pour qu'ils s'abstiennent de répondre à certaines questions, c'est-à-dire pour que les détecteurs ne puissent les détecter ? La plupart des physiciens sont très sceptiques face à cette hypothèse. Ils ont l'impression que l'on comprend très bien le fonctionnement des détecteurs de photons. De plus, des expériences ont

été réalisées avec beaucoup de types de détecteurs différents : semi-conducteur, supraconducteur, thermique, etc. Pourtant, si on prend l'hypothèse de variables supplémentaires au sérieux, il n'y a vraiment aucune raison de penser que ces variables n'ont aucun effet sur les probabilités de détection. Une fois de plus, la seule bonne réponse est l'expérience. Mais aucune expérience ne peut avoir un taux de détection de strictement 100 %. Une stratégie pour contourner cette difficulté est de décider que si l'appareillage physique ne produit aucune réponse, alors on décide de compter ces événements comme des réponses 0. Ainsi, on aura toujours une réponse ! Avec évidemment une majorité de 0.

Un argument permet de montrer qu'avec cette stratégie il suffit de détecter 82,8 % des photons au jeu de Bell pour exclure toute explication basée sur des variables locales supplémentaires (voir encadré 10). Mais 82,8 %, c'est encore beaucoup trop pour la technologie photonique d'aujourd'hui. Heureusement, on peut également jouer au jeu de Bell avec d'autres particules que des photons. Deux groupes de physiciens américains ont utilisé des ions (des atomes ayant perdu un électron) pour gagner au jeu de Bell avec une qualité suffisante pour fermer l'échappatoire de détection².

Il aura fallu plus de vingt ans pour fermer cette échappatoire, une durée qui illustre bien la difficulté technique de l'opération.

Encadré 10 Échappatoire de détection

Notons p la probabilité que la boîte d'Alice produise un résultat et supposons que la boîte de Bob produise un résultat avec la même probabilité. Ainsi, avec la probabilité p^2 les deux boîtes produisent un résultat. Dans ce cas, Alice et Bob gagnent au jeu de Bell $2 + \sqrt{2} \approx 3,41$ fois sur 4. Avec la probabilité $(1 - p)^2$ aucun résultat n'est produit. Dans ce cas, Alice et Bob compte ces non-c comme des 0 et gagnent donc 3 fois sur 4. Quand une seule boîte produit un résultat, Alice et Bob gagne la moitié du temps, donc 2 fois sur 4. Donc, en moyenne le taux de succès d'Alice et Bob est de :

$$p^2 \cdot (2 + \sqrt{2}) + 2 p(1 - p) \cdot 2 + (1 - p)^2 \cdot 3$$

Ce taux est supérieur à 3 pour p supérieur à $2/(1 + \sqrt{2}) \approx 82,8 \%$.

Échappatoire de localité

Une autre difficulté majeure de toute démonstration expérimentale du jeu de Bell est la nécessité d'une stricte synchronisation. La boîte d'Alice doit produire le résultat a avant que le choix de Bob n'ait pu lui être communiqué, de façon volontaire ou involontaire, de façon évidente ou cachée. La relativité impose une vitesse maximale à toute communication, celle de la lumière. Ainsi, à partir de l'instant où Bob fait son choix y , jusqu'à l'instant où la boîte d'Alice produit le résultat a , il ne doit pas s'écouler plus de temps que le temps mis par la lumière pour parcourir la distance séparant Bob de la boîte d'Alice. Réciproquement, aucune information concernant le choix d'Alice ne doit avoir le temps de parvenir à la boîte de Bob avant que cette dernière ne produise le résultat b . Sinon, on ouvre ce qu'on appelle l'échappatoire de localité (Alice et Bob seraient « localement connectés », au sens de la relativité)³.

Pour fermer l'échappatoire de localité, il faut donc jouer au jeu de Bell (et le gagner plus souvent que 3 fois sur 4) tout en garantissant qu'Alice et Bob sont suffisamment éloignés et bien synchronisés. Les physiciens disent qu'ils doivent être séparés par une distance « du genre espace ». Notez que la séparation concerne tout l'intervalle de temps chez Alice entre l'instant où le choix x est fait jusqu'à l'instant où un résultat a est enregistré (x et a sont toutes deux des variables classiques, donc non soumises à l'indétermination quantique) ; tout cet intervalle doit être séparé de l'intervalle correspondant chez Bob.

Pour illustrer la difficulté technique, imaginons qu'Alice et Bob soient distants d'une dizaine de mètres, comme dans la célèbre expérience d'Aspect décrite ci-dessous. La lumière met 30 milliardièmes de seconde pour parcourir ces 10 mètres. On comprend qu'il soit difficile de faire un choix, d'ajuster la mesure à faire (l'équivalent de pousser la manette) et d'enregistrer le résultat en un temps aussi infime. Il n'est évidemment plus question de laisser une personne faire un libre choix, encore moins de pous-

ser une manette, mais même avec l'optoélectronique moderne, une distance de 10 mètres est trop courte. Il faudrait des centaines de mètres, ou mieux quelques kilomètres. Ou encore être malin comme un physicien.

Mais avant de voir comment Alain Aspect et ses collaborateurs ont contourné la difficulté, observons que la grande majorité des expériences de Bell (les physiciens ne parlent pas de jeu de Bell, « expérience de Bell » sonne plus sérieux) ne se préoccupent pas de cette échappatoire. D'une part parce que c'est difficile, mais surtout parce que les professeurs qui planifient ces expériences savent bien que pour éviter que deux étudiants ne copient l'un sur l'autre pour réussir leurs examens, comme les boîtes d'Alice et Bob afin de gagner au jeu de Bell, il n'est pas nécessaire de les mettre dans des locaux séparés d'une distance du genre espace, il suffit de s'assurer qu'il ne leur est raisonnablement pas possible de s'influencer.

Pour contourner la difficulté imposée par la taille de son laboratoire (une dizaine de mètres), Alain Aspect a imaginé la stratégie suivante. Après que les photons quittent la source, ils sont dirigés au hasard par une sorte de miroir vibrant vers l'un ou l'autre de deux appareils de mesure. Chaque appareil fait toujours la même mesure (le même choix), mais comme il y a deux appareils, les photons au moment de quitter la source et de se séparer dans l'espace ne peuvent pas anticiper vers quel appareil ils seront dirigés. Ils ne peuvent pas anticiper les questions auxquelles ils devront répondre. Avec cette astuce, il suffit que les orientations des deux miroirs, celui du côté d'Alice et celui du côté de Bob, vibrent indépendamment l'un de l'autre et à une fréquence suffisamment grande pour qu'aucune information sur la position de l'un ne puisse influencer le résultat de l'autre côté. La difficulté qui subsiste est ainsi de s'assurer que les miroirs vibrent bien aléatoirement et indépendamment l'un de l'autre.

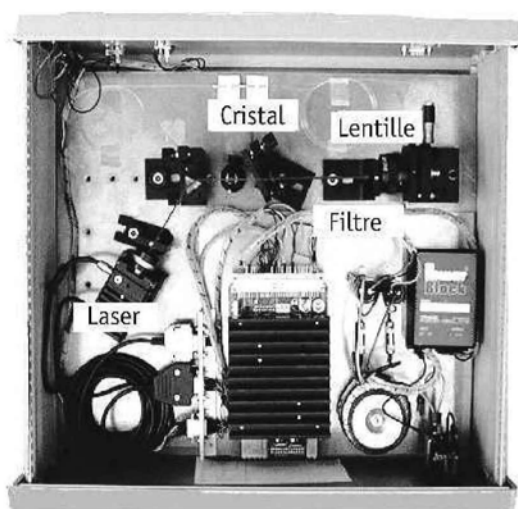
Grâce à cette astuce, Aspect et ses collaborateurs ont pu fermer l'échappatoire de localité en 1982⁴. Cette expérience, réalisée à Orsay au sud de Paris, restera à tout jamais dans l'histoire de la physique. Depuis, quelques autres expériences ont également

fermé cette échappatoire. Anton Zeilinger, alors à l'Université d'Innsbruck en Autriche, a réalisé en 1998 une très belle expérience sur quelques centaines de mètres⁵. Lui et ses collègues ont utilisé deux générateurs aléatoires quantiques pour effectuer les choix d'Alice et Bob, et ont enregistré les résultats localement dans deux ordinateurs. Chaque ordinateur enregistrerait l'heure des événements, les choix et les résultats : le jeu de Bell a été gagné en moyenne 3,365 fois sur 4.

À Genève, nous avons aussi fermé cette échappatoire sur un peu plus de 10 kilomètres en utilisant le réseau de télécommunication en fibre optique de notre opérateur national Swisscom, entre deux villages, Bellevue au nord de Genève et Bernex au sud⁶. Pour cela nous avons utilisé une astuce un peu différente de celle d'Aspect⁷. Chez Alice, un miroir semi-transparent envoie aléatoirement les photons sur un appareil de mesure (correspondant à « manette à gauche ») ou sur un autre (« manette à droite ») et, à chaque instant, seuls les détecteurs d'un seul des deux appareils sont actifs. Ainsi, à chaque instant, il n'y a qu'un seul appareil chez Alice qui soit prêt à mesurer le photon incident. Évidemment, on perd la moitié des photons, et l'on ouvre l'échappatoire de détection, mais celui-ci est de toute façon déjà très largement ouvert par les pertes dans les fibres optiques et l'efficacité limitée des détecteurs. Notre expérience est en fait équivalente à celles de Paris et d'Innsbruck tout en étant bien plus simple à mettre en œuvre. La figure 10b montre la source de paires de photons intriqués que nous avons utilisée. Notez que cette petite boîte, compatible avec les fibres optiques standard, contient l'équivalent du grand laboratoire d'Aspect de la figure 10a. La technologie et l'imagination des physiciens ont permis de faire d'énormes progrès en quinze ans !



10 a



10 b

Figure 10. Les figures 10a et 10b illustrent l'énorme progrès des technologies quantiques. La figure 10a est une photo du laboratoire d'Alain Aspect en 1982, quand il est devenu le premier homme à avoir gagné au jeu de Bell. On y voit un grand laboratoire encombré. Tous ces appareils constituent la source de photons intriqués utilisée pour cette expérience historique. La figure 10b est une photo de la source que nous avons utilisée à Genève en 1997 lors de la première expérience d'intrication hors laboratoire, entre les villages de Bernex et de Bellevue. Cette boîte à moitié vide, d'environ 30 centimètres de côté, contient une source de photons intriqués encore plus efficace que celle d'Aspect. Seulement quinze ans séparent ces deux expériences.

Une combinaison d'échappatoires ?

L'expérience d'Aspect de 1982 suivie de celles d'Innsbruck et de Genève ont fermé l'échappatoire de localité. Bien sûr, dans ces trois expériences, l'échappatoire de détection est restée béante et dans les expériences qui ont fermé cette dernière, l'échappatoire de localité est restée ouverte. On peut donc logiquement imaginer que la nature utilise l'une ou l'autre de ces échappatoires, suivant les circonstances, afin de nous tromper. C'est en fait si peu plausible que presque aucun physicien n'y croit. En effet, ils ont tendance à considérer la nature comme un partenaire fiable : la nature ne triche pas. « Dieu est subtil, mais pas malveillant », a écrit Einstein. Il n'en reste pas moins qu'à choisir entre une nature non locale et une autre suivant certaines lois complexes qui nous échappent aujourd'hui et qui lui permet d'user à la fois des deux échappatoires, celle de détection et celle de localité, le choix n'est pas évident. Et, puisqu'il s'agit de science expérimentale, la seule réponse honnête consiste à faire une expérience qui teste simultanément les deux échappatoires. La raison pour laquelle une telle expérience n'a pas encore été réalisée est sa difficulté : pour fermer l'échappatoire de détection, il vaut mieux utiliser des particules massives, plus faciles à détecter que des photons, mais pour l'échappatoire de localité, les photons sont préférables car ils se propagent facilement sur de grandes distances. Il faudra donc vraisemblablement attendre que la technologie permette d'utiliser des photons intriqués pour distribuer l'intrication sur de grandes distances, puis de « téléporter » cette intrication à des atomes permettant d'abord de vérifier que les photons sont bien arrivés, enfin de les détecter efficacement. Cette perspective fascinante verra probablement le jour dans les dix ans à venir.

Il n'en demeure pas moins qu'aujourd'hui il y a là une combinaison d'échappatoires logiquement possible. Cette combinaison doit donc être soumise à l'expérience.

Une communication supraluminique cachée ?

Y a-t-il d'autres échappatoires possibles ? Question difficile, puisque l'on court toujours le risque de pécher par manque d'imagination. Toutefois, il semble bien que depuis les décennies que des physiciens, des philosophes, des mathématiciens et des spécialistes de la théorie de l'information se penchent sur la question, aucune alternative crédible n'a été trouvée. Dans le reste de ce chapitre, nous allons néanmoins explorer certaines pistes.

Une première possibilité qui vient à l'esprit est qu'une influence cachée – cachée à nos yeux de physiciens du début du xx^{e} siècle – se propage d'Alice à Bob à une vitesse supérieure à celle de la lumière. De façon surprenante, c'est ainsi que les livres de physique non relativistes racontent les expériences de Bell : la mesure chez Alice provoquerait à distance un « effondrement » non local de la fonction d'onde chez Bob. Cette histoire n'est pas compatible avec la relativité mais, faute de mieux, c'est ce qu'on enseigne à nos étudiants !

Cette hypothèse d'une influence cachée correspond aussi à l'intuition de John Bell qui a écrit que tout se passe comme si « quelque chose se passait en coulisses qui ne serait pas autorisé à apparaître sur scène⁸ ».

Une vitesse supraluminique ne peut être définie que si l'on fait l'hypothèse que cette vitesse est définie par rapport à un référentiel particulier, appelé référentiel privilégié. Rappelons qu'un référentiel est un choix de repères d'espace dont la vitesse est constante.

L'hypothèse selon laquelle il existerait un référentiel privilégié ne respecte pas l'esprit de la relativité, et n'est donc pas en odeur de sainteté auprès de la majorité des physiciens. Toutefois, cette hypothèse de référentiel privilégié n'est pas en contradiction avec la relativité. Pour s'en convaincre, il suffit de remarquer que la cosmologie actuelle inclut un tel référentiel : celui défini depuis le big-bang comme le centre de masse de l'univers. Les physiciens l'ont même mesuré d'une façon extraordinairement précise comme le

référentiel dans lequel le bruit de fond micro-onde qui remplit tout le cosmos, le vestige qui subsiste encore de nos jours du big-bang, est isotrope. Par rapport à ce référentiel, la Terre se déplace à environ 369 kilomètres par seconde⁹. La direction du déplacement de la Terre est également bien connue.

L'hypothèse d'un référentiel privilégié dans lequel des « influences » peuvent se propager à une vitesse supérieure à celle de la lumière n'est donc pas à exclure d'emblée. Ne serait-ce pas là une explication de l'origine des corrélations non locales ? Si c'est bien le cas, ces corrélations ne seraient pas « non locales » puisqu'on aurait trouvé une explication locale, c'est-à-dire un mécanisme qui se propage de proche en proche. Mais comment tester une telle hypothèse puisqu'on ne connaît *a priori* pas cet hypothétique référentiel privilégié ? Pour pouvoir effectuer un tel test, l'idée est la même que pour l'échappatoire de localité : il faut qu'Alice et Bob effectuent leurs choix et collectent leurs résultats simultanément de telle sorte que l'influence hypothétique n'arrive pas à temps. Il suffit qu'une plus grande distance sépare Alice et Bob, ou d'une meilleure synchronisation. La difficulté est qu'il faut préciser dans quel référentiel on doit synchroniser Alice et Bob, car s'ils sont bien synchronisés dans un référentiel, ils le seront mal dans d'autres référentiels. Ce problème n'existe pas tant que les vitesses sont inférieures ou égales à celle de la lumière, car si la synchronisation est telle que la lumière n'arrive pas à temps dans un référentiel, elle n'arrive pas non plus à temps dans tous les autres référentiels. Mais pour des vitesses supérieures, il faut savoir dans quel référentiel synchroniser Alice et Bob.

Un physicien suisse, Philippe Eberhard, travaillant au Lawrence National Laboratory, près de Berkeley aux États-Unis, a trouvé une superbe astuce permettant de tester dans une seule expérience tous les référentiels hypothétiques possibles. Son idée est relativement simple ; le lecteur curieux en trouvera un résumé dans l'encadré 11. Disons simplement que l'idée exploite la rotation de la Terre en vingt-quatre heures et impose qu'Alice et Bob soient disposés selon un axe est-ouest.

Encadré 11 **L'expérience Satigny-Jussy**

Imaginons qu'Alice et Bob soient orientés selon un axe est-ouest et que leurs mesures soient bien simultanées selon leurs horloges, c'est-à-dire simultanées par rapport au référentiel de Genève (comme la Terre tourne sur elle-même, le référentiel de Genève change continuellement, mais ce changement est très lent, donc négligeable durant le temps d'une mesure). Selon la théorie de la relativité, les mesures d'Alice et Bob sont, dans ce cas, également simultanées par rapport à n'importe quel référentiel qui se déplace dans une direction perpendiculaire à l'axe Alice-Bob, donc à n'importe quel référentiel qui se déplace dans une direction se trouvant dans un plan passant par les pôles nord et sud de la Terre. En douze heures, quand la Terre effectue un demi-tour sur elle-même, ce plan tourne lui aussi d'un demi-tour. Ce faisant, il balaye tout l'espace. Ainsi, si Alice et Bob jouent continuellement au jeu de Bell pendant douze heures et si un référentiel privilégié existe, il y aura forcément un moment où leurs mesures seront parfaitement simultanées par rapport à ce référentiel privilégié. Si Alice et Bob gagnent continuellement plus de 3 fois sur 4 au jeu de Bell, alors l'explication par une communication supraluminique définie dans un référentiel privilégié est falsifiée. En pratique, la synchronicité n'est pas parfaite, l'axe est-ouest non plus et le temps nécessaire pour une expérience de Bell pas totalement négligeable : on ne peut donc que mettre une borne inférieure à la vitesse de cette influence supralumineuse hypothétique.

Une telle expérience a été réalisée par mon groupe entre deux villages proches de Genève, Satigny à l'ouest et Jussy à l'est, distants d'environ 18 kilomètres. L'expérience a duré douze heures, le temps pour la Terre d'effectuer un demi-tour, et elle a été répétée quatre fois¹⁰. Une équipe italienne a réalisé une expérience similaire¹¹. L'interprétation des résultats est un peu compliquée car elle dépend de la vitesse de la Terre par rapport à cet hypothétique référentiel privilégié, vitesse qu'on ne connaît évidemment pas. Si l'on suppose que cette vitesse est inférieure à celle de la Terre par rapport au centre de masse de l'univers, alors l'expérience permet d'exclure toute influence jusqu'à une vitesse de cinquante mille fois la vitesse

de la lumière. Il s'agit là d'une vitesse absolument colossale, inimaginable pour la majorité des physiciens qui concluent à l'absence d'influence. Il n'y aurait donc pas d'« influence fantôme à distance », selon l'expression célèbre d'Einstein. Encore une fois, les corrélations non locales semblent simplement surgir de l'extérieur de l'espace-temps.

Mais cinquante mille fois la vitesse de la lumière n'est peut-être pas suffisant. Peut-être faut-il répéter l'expérience avec une meilleure précision et exclure des vitesses jusqu'à un million de fois celle de la lumière ? Rappelons que le rapport entre la vitesse de la lumière et celle du son dans l'air est d'environ un million (340 m/s par rapport à 300 000 km/s), donc pourquoi ne pas imaginer que la prochaine vitesse soit à nouveau un million de fois plus grande ?

Et qu'en serait-il d'une vitesse d'influence infinie (toujours définie dans un référentiel privilégié) ? Cela est mathématiquement possible, comme l'a démontré David Bohm en 1952 (l'année de ma naissance)¹². Toutefois, cette hypothèse implique que des influences peuvent instantanément connecter des régions quelconques. Que signifierait alors l'espace, si des influences peuvent connecter instantanément des régions arbitrairement éloignées l'une de l'autre ? En quelque sorte, accepter de telles influences comme explication des corrélations non locales signifie que l'on accepte que ces influences ne se propagent pas dans notre espace, mais empruntent un raccourci de longueur nulle hors de notre espace. Le pouvoir explicatif d'une telle hypothèse me semble donc faible¹³. Peu de physiciens s'intéressent à cette alternative, même s'il faut reconnaître qu'elle attire la sympathie de pas mal de philosophes.

Certains théoriciens tentent de suppléer à la difficulté des expériences qui ne pourront jamais que trouver une borne supérieure à la vitesse de ces influences hypothétiques en montrant que, sous certaines hypothèses, toute influence cachée supraluminique doit nécessairement permettre de communiquer à une vitesse supraluminique¹⁴. Comme cela est interdit par la relativité, on pourrait en conclure à l'absence d'influence cachée, quelle que soit sa vitesse. Il s'agit d'un programme de recherche très intéressant qui permettrait d'exclure une bonne fois pour toutes l'hypothèse d'une

influence cachée supraluminique. Heureuse coïncidence : pendant la rédaction de ce livre, une équipe de théoriciens a réussi le tour de force d'exclure toute explication de la non-localité par des influences se propageant à n'importe quelle vitesse finie (voir chapitre 10).

Alice et Bob mesurent chacun avant l'autre

Je vais brièvement présenter une autre idée qui montre bien l'imagination dont font preuve les physiciens pour s'affranchir de la non-localité. Selon cette hypothèse, due à Antoine Suarez et Valerio Scarani¹⁵, quand la boîte d'Alice produit un résultat elle en informe le reste de l'univers, en particulier la boîte de Bob, à une vitesse supraluminique ; et réciproquement de Bob à Alice. Ainsi, le premier à produire un résultat en informe le second qui en tient compte pour gagner au jeu de Bell, comme à la section précédente. Mais selon cette hypothèse, la vitesse supraluminique n'est pas définie par rapport à un référentiel universel privilégié, mais par rapport au référentiel dans lequel la boîte émettrice est immobile (son référentiel d'inertie, disent les physiciens). En effet, chaque « boîte », en particulier chaque appareil de mesure, définit un référentiel ; il est donc intéressant d'examiner les conséquences du fait que ces référentiels déterminent la vitesse des informations qu'elles émettent.

Une telle hypothèse semble difficile à tester. D'ailleurs, quand en 1997 Suarez et Scarani ont proposé leur hypothèse, elle était en accord avec toutes les expériences réalisées. Mais considérons la situation suivante : Alice et Bob, avec leurs boîtes, s'éloignent l'un de l'autre à grande vitesse. Ainsi, le référentiel de la boîte d'Alice diffère du référentiel de la boîte de Bob. Rappelons que, selon la relativité d'Einstein, la chronologie de deux événements vus depuis deux référentiels en mouvement l'un par rapport à l'autre peut être différente. On peut donc arranger une expérience telle qu'Alice, dans son référentiel, fait son choix et collecte son résultat avant Bob, tandis que dans la même expérience, Bob dans son référentiel fait

lui aussi son choix et collecte son résultat avant Alice. Les physiciens parlent d'une expérience « *before-before* » ou « avant-avant », puisque chacun des deux partenaires, Alice et Bob, agit avant l'autre ! La magie de la relativité permet de tester la magie quantique.

La difficulté principale d'une expérience « *before-before* » est qu'il faut mettre en mouvement les boîtes d'Alice et de Bob de façon que leurs vitesses soient suffisantes pour que l'ordre chronologique soit opposé dans les deux référentiels. C'est difficile, mais pas impossible... avec un peu d'imagination. Mettre tout le laboratoire d'Alice dans une fusée n'est pas très réaliste. Toutefois, ne suffit-il pas de mettre en mouvement le composant clé, celui dans lequel le vrai hasard se produit ? Dans une première expérience à Genève¹⁶, nous avons mis une sorte de détecteur sur un disque tournant à 10 000 tours/minute, ce qui correspond à une vitesse tangentielle (au bord du disque) de 380 km/h (environ 100 m/s)¹⁷. Cette vitesse peut sembler très loin d'une vitesse relativiste, la vitesse de la lumière étant d'environ 300 000 km/s. Toutefois, si Alice et Bob sont distants de plus de 10 kilomètres, une bonne synchronisation permet déjà d'obtenir l'effet relativiste de « *before-before* ». L'expérience a permis de réfuter l'hypothèse de Suarez et Scarani (avec un petit bémol : le disque ne portait pas un vrai détecteur, mais seulement un absorbeur. L'information « photon absorbé/pas absorbé », l'équivalent du résultat d'Alice, a été lue sur un autre détecteur placé à l'autre sortie de l'interféromètre).

Antoine Suarez, qui suivait cette expérience de très près, a immédiatement réagi en disant que ce n'est pas le détecteur qui doit être mis en mouvement, mais le dernier miroir semi-transparent de l'interféromètre. Pour lui, c'est ce miroir qui est le *choice device*, le composant où le choix du résultat se fait (au vrai hasard, vous l'avez compris). Comment mettre un tel miroir semi-réfléchissant en mouvement rapide ? Il n'a pas fallu longtemps à mon collaborateur Hugo Zbinden pour trouver la réponse : « Utilisons une onde acoustique se propageant dans un cristal », proposa-t-il. Comme cette onde se propage à environ 2,5 km/s, l'expérience peut être réalisée en laboratoire. Et, une fois de plus, la théorie quantique en

est sortie renforcée : même avec des miroirs en mouvement, Alice et Bob gagnent au jeu de Bell plus souvent que 3 fois sur 4¹⁸. Après quelques jours difficiles, Antoine Suarez a fini par accepter ce résultat. Même si leur théorie a été falsifiée (réfutée), ils peuvent être fiers d'avoir proposé une théorie scientifique plausible.

Hyperdéterminisme et libre arbitre

Quelle échappatoire reste-t-il ? Une hypothèse un peu désespérée consiste à nier à Alice et à Bob la possibilité de choisir librement dans quelle direction pousser la manette sur leurs boîtes. Cette hypothèse revient donc à nier l'existence du libre arbitre. Ainsi, si Alice ne fait pas un choix libre, mais est programmée pour, à chaque minute, pousser sa manette dans une direction prédéterminée, on pourrait imaginer que Bob – ou sa boîte – connaît le choix d'Alice. Dans ce cas, on peut aussi supposer que les résultats chez Alice sont prédéterminés et que Bob, qui connaît tout, pourrait facilement gagner au jeu de Bell. Notez qu'il pourrait même gagner à coup sûr, c'est-à-dire plus souvent que ce que permet la physique quantique.

Nier l'existence du libre arbitre : quelle drôle d'idée ! Faut-il être choqué par la non-localité pour en arriver à nier ce que nous connaissons le plus intimement. Nous pouvons nous cultiver, apprendre des mathématiques, de la chimie et de la physique, et encore énormément de choses, mais jamais nous ne connaissons une équation, un fait historique ou une réaction chimique aussi bien que ce que notre expérience intime nous dit. À mes yeux, il ne s'agit que d'une grossière erreur d'épistémologie.

Si nous n'avions pas de libre arbitre, nous ne pourrions jamais décider de tester une théorie scientifique. Nous pourrions vivre dans un monde où les objets ont tendance à voler, mais être programmés pour ne regarder que quand ils se trouvent être en train de tomber. J'avoue ne pas pouvoir vous prouver que vous jouissez de libre arbitre, mais moi j'en jouis et vous ne pourrez jamais me prouver le contraire. C'est typiquement une discussion qui tourne en rond :

logiquement possible, mais totalement inintéressante, un peu comme le solipsisme qui affirme que je suis le seul à exister, et que vous n'êtes que des illusions de mon esprit.

Cette hypothèse d'hyperdéterminisme ne mérite d'être mentionnée que pour souligner à quel point de nombreux physiciens, même parmi les spécialistes de la physique quantique, sont désespérés par le vrai hasard et la non-localité de la physique quantique. Pour moi, la situation est très claire : non seulement le libre arbitre existe, mais il vient logiquement avant la science, la philosophie et notre capacité à raisonner. Sans libre arbitre, pas de raisonnement. En conséquence, il est tout simplement impossible pour la science et la philosophie de nier le libre arbitre. Certaines théories physiques sont déterministes, telles que par exemple la mécanique de Newton ou certaines interprétations de la physique quantique. Élever ces théories à un statut de vérité ultime, quasi religieuse, est une simple erreur de logique, puisque cela est contredit par notre expérience du libre arbitre. Notez que Newton n'a jamais prétendu que sa théorie expliquerait tout (et ce n'est pas que Newton manquait d'ego !), au contraire, il a explicitement écrit que sa théorie de la gravitation avec une attraction non locale à distance était absurde mais que, faute de mieux, on pouvait l'utiliser pour faire des calculs. C'est Laplace qui a élevé la théorie de Newton à un statut quasi religieux en énonçant sa célèbre phrase¹⁹ : « Une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux. »

L'histoire de la mécanique quantique est différente, son principal père fondateur, Niels Bohr, ayant beaucoup insisté sur la complétude de sa théorie, bien qu'aucune théorie scientifique ne puisse être véritablement complète.

Bref, nier à Alice la possibilité de faire des choix libres revient à nier la pertinence de toute science. Nous laisserons donc là cette

hypothèse désespérée. Cela n'empêchera pas la science de progresser et de mieux comprendre le libre arbitre, mais je suis persuadé que la science n'épuisera jamais ce sujet. Et pour terminer cette section sur une note plus légère, on pourrait paraphraser Newton : Que le libre arbitre soit une illusion, de sorte qu'un homme puisse avoir la conviction de l'existence de corrélations non locales à distance, à travers un espace vide, sans la médiation de quelque autre chose pour transporter l'action et la force de l'un à l'autre, cela est pour moi une si grande absurdité qu'à mon avis aucun homme ayant une faculté de réfléchir avec compétence aux problèmes philosophiques ne peut y tomber.

Réalisme

Pour conclure ce chapitre, voici une autre hypothèse désespérée : nier le réalisme. Qu'est-ce que cela pourrait bien vouloir dire et en quoi cela pourrait-il éclairer notre lanterne²⁰ ?

Avant 1990, il était pratiquement impossible de publier un article dans une revue prestigieuse en utilisant des mots tels que « non local » ou même « inégalité de Bell ». Les pères fondateurs de la physique quantique avaient dû lutter ferme pour imposer cette nouvelle physique, et les tenants de la physique de Newton leur ont tenu la dragée haute durant de longues années. La génération suivante a poursuivi cette lutte, bien qu'il n'y ait plus beaucoup d'adversaires. Ils se sont ainsi enfoncés à nier la possibilité de progrès et ce jusqu'au début des années 1990, quand des applications de l'intrication et de la non-localité ont forcé la communauté à regarder cet aspect de la physique quantique avec un regard neuf et – surtout – dépourvu de préjugé²¹. Toutefois, une habitude avait été prise, celle de systématiquement écrire et parler de « réalisme local » au lieu de « variable locale ». Je pense qu'il s'agissait là davantage d'une précaution oratoire que du fruit d'une profonde réflexion.

Il est aujourd'hui à la mode dans certains cercles de dire qu'on a le choix entre la non-localité et le non-réalisme. La première chose

à faire serait bien évidemment de définir ce qu'on entend par non-réalisme (en se rappelant que non-localité signifie « qui ne peut pas se décrire en utilisant uniquement des entités locales »)²². Malheureusement je ne peux pas vous dire ce que signifie non-réalisme. Mon sentiment est qu'il s'agit avant tout d'une échappatoire d'ordre psychologique : ceux qui ne peuvent pas admettre la non-localité se réfugient dans un abri intellectuel, un peu comme ces Suisses prêts à plonger dans leurs abris antiatomiques en cas d'alerte : c'est très bien, mais un jour ou l'autre, il faudra bien en sortir.

N'y a-t-il vraiment rien à conclure ? Pas tout à fait. Revenons à la base du jeu de Bell. Les choix d'Alice et de Bob doivent être « réels », ainsi que leurs résultats. Les physiciens et informaticiens diraient que les inputs et outputs des boîtes d'Alice et Bob doivent être des variables classiques, c'est-à-dire des nombres (bits) qu'on peut reconnaître, copier, mémoriser, publier, bref des entités bien concrètes, non soumises aux indéterminations quantiques. Nous avons déjà discuté dans la section précédente de l'hypothèse que les choix (les inputs) ne seraient qu'illusion, mais qu'en est-il des résultats produits par les boîtes (les outputs) ? Se pourrait-il que ces résultats ne soient pas réels ? Si ces résultats n'étaient qu'une illusion de notre esprit, on reviendrait à une discussion oiseuse sur une forme de solipsisme. Cela dit, on peut sérieusement se demander quand, exactement, ces résultats sont produits. Pour éviter que les boîtes ne puissent s'influencer, il faut que ces résultats soient produits avant qu'une éventuelle influence n'ait eu le temps d'arriver. En principe, il suffit d'éloigner suffisamment les deux boîtes, mais en pratique ce n'est pas si simple. En effet, la physique quantique est assez obscure sur le moment où le résultat d'une mesure est produit. Pour la grande majorité des expérimentateurs, une fois qu'un photon a pénétré les premiers microns de la surface d'un détecteur et a déclenché une avalanche d'électrons, le résultat est déjà là. Mais comment en être sûr ? Peut-être faut-il attendre l'amplification finale ? ou même l'enregistrement dans la mémoire d'un ordinateur ? ou dans une mémoire humaine ? Concernant cette dernière hypothèse, John Bell avait l'habitude d'éclater de rire et

de demander s'il est nécessaire que cette mémoire humaine appartienne à un physicien avec une thèse de doctorat !

Bien que la physique quantique ne sache pas dire précisément à partir de quel moment on peut être certain qu'un résultat a été produit, il est clair que cela se produit entre le moment où le photon rencontre un détecteur et bien avant que nous n'en prenions conscience. Voici donc une petite faille : peut-être les résultats sont-ils produits bien plus tard que les expérimentateurs se l'imaginent et qu'une communication subtile en profite pour s'établir entre les boîtes d'Alice et de Bob²³.

Deux physiciens, Lajos Diosi et Roger Penrose, ont indépendamment développé un modèle théorique qui relie la durée d'une mesure à des effets gravitationnels²⁴. Leurs modèles font pratiquement la même prédiction. Pour la tester, il faut que Bob bouge très rapidement un objet massif dès que son détecteur de photon fait « clic ». Récemment, avec mon groupe à l'Université de Genève, nous avons testé ces modèles et leur implication pour le jeu de Bell. Le résultat est en parfait accord avec la théorie quantique : les modèles de Diosi et Penrose ne fournissent pas d'échappatoire à la non-localité²⁵. Décidément, la non-localité quantique est réellement fort robuste !

Multivers

Une dernière échappatoire à la mode chez certains physiciens quantiques consiste à supposer qu'il n'y a jamais de résultats de mesures. Selon cette hypothèse, chaque fois que nous avons l'illusion d'effectuer une mesure ayant N résultats possibles, l'univers se divise en N branches, toutes aussi réelles les unes que les autres, avec dans chaque branche un résultat. L'expérimentateur aussi se divise en N copies, chacune « voyant » l'un des N résultats possibles. C'est l'interprétation des mondes multiples, ou *multivers* par opposition à notre *univers*. Les adeptes de cette interprétation affirment que leur « solution » est la plus simple car elle évite le vrai hasard

et doit donc être acceptée selon le principe du rasoir d'Occam, qui stipule que parmi plusieurs hypothèses il faut choisir la plus simple.

À chacun de juger de la simplicité de cette interprétation. Quant à moi, je me contente de remarquer deux choses. D'une part, on peut toujours nier le vrai hasard, quelles que soient la théorie et l'évidence expérimentale : il suffit de postuler que, chaque fois que le vrai hasard se manifeste, l'univers se divise, et que chaque résultat se réalise dans l'un des univers parallèles. Pour moi, cela sent fortement l'hypothèse *ad hoc*²⁶. D'autre part, l'interprétation du multivers implique un déterminisme totalitaire. En effet, selon cette interprétation, l'intrication n'est jamais rompue, mais s'étale de plus en plus. Ainsi, tout est intriqué avec tout et il ne reste aucune marge de manœuvre pour le libre arbitre. La situation est encore pire qu'avec le déterminisme de Newton. Chez ce dernier, les choses sont bien localisées et logiquement séparées. Sa théorie laisse donc la place pour une théorie future qui décrirait un monde ouvert, un monde où le présent ne déterminerait pas entièrement le futur²⁷. Cet espoir s'est d'ailleurs réalisé avec la théorie quantique (même si cette dernière est encore très loin d'expliquer le libre arbitre). En revanche, le multivers ne laisse aucun espoir d'un monde ouvert²⁸.

Chapitre 10

RECHERCHES ACTUELLES SUR LA NON-LOCALITÉ

Mais alors, saperlipopette, comment font ces deux régions de l'espace-temps pour « savoir » ce qui se passe dans l'autre région ? Pour moi, il s'agit là d'une question extrêmement sérieuse. C'est même le nœud de la révolution conceptuelle en cours. Comment se fait-il qu'aussi peu de physiciens s'en préoccupent ? Et pourquoi cette question a-t-elle été ignorée entre 1935, année de la publication du paradoxe EPR, et le début des années 1990, quand Artur Ekert a montré que ces corrélations peuvent être utiles en cryptographie¹ ? Les raisons sont complexes : en 1935, les physiciens avaient mieux à faire avec la toute nouvelle théorie quantique, qui permettait tout à coup de décrire une multitude de nouveaux phénomènes ; l'intrication et la non-localité pouvaient attendre. Puis l'influence de Bohr et de son « école de Copenhague » a fait taire les curieux en affirmant haut et fort que la mécanique quantique est complète.

L'absurdité d'une telle affirmation ne s'est révélée que lentement, les physiciens étant restés longtemps abasourdis par les succès de cette nouvelle physique. En effet, comment une théorie scientifique pourrait-elle être complète ? Cela suppose que nous approchons de la théorie ultime, celle après laquelle il n'y aurait plus rien à chercher car il n'y aurait plus rien à trouver. Effrayant ! Mais, de tout temps, et surtout en fin de siècle, certains y ont cru. Le titre du livre du prix Nobel de physique Steven Weinberg *Rêve d'une théorie ultime* l'illustre bien². Encore aujourd'hui certains

parlent très sérieusement de la théorie du tout (*theory of everything* ; ils en parlent non sans humour puisque TOE, l'acronyme, signifie « orteil » en anglais). Évidemment il ne s'agit pas d'une théorie existante, mais d'un fantasme significatif.

Les choses ont changé au début des années 1990 grâce à l'apport d'une nouvelle génération de physiciens et à une synergie avec l'informatique théorique : une histoire curieuse et passionnante³.

Peut-on « peser » la non-localité ?

Maintenant que la non-localité quantique est fermement établie, les physiciens veulent jouer avec. Ils adorent jouer, ce qui agace parfois les personnes qui se prennent au sérieux. Pourtant, ce n'est qu'en jouant que l'on se familiarise avec un nouvel objet, que ce soit un jouet d'enfant ou un concept scientifique. Alors jouons ! Vous avez bien sûr remarqué que tout ce livre est basé sur un jeu, le jeu de Bell. Et c'est grâce à ce jeu que nous avons pu pénétrer au cœur de la physique quantique et de sa caractéristique la plus remarquable : la non-localité.

Une autre manie des physiciens est de tout vouloir quantifier, de vouloir tout « peser ». La non-localité n'a bien sûr pas de poids, mais il est important de pouvoir la mesurer, de dire de deux formes de non-localité, laquelle est la plus « grande » ou la plus « profonde ». Pour la non-localité, les physiciens n'ont pas encore trouvé une bonne mesure ; il semble que suivant l'aspect de la non-localité qu'on analyse, on trouve différentes manières de la mesurer⁴. Cela est le signe qu'on n'a pas encore tout compris du concept.

La question de mesurer la « quantité d'intrication » se pose aussi tout naturellement. Ici, d'énormes progrès ont été réalisés depuis 1990, même s'il faut à nouveau avouer que la question laisse encore bien des points en suspens. Est-ce décevant ? Bien au contraire : c'est le signe qu'il y a encore beaucoup à découvrir.

Pourquoi ne pas gagner au jeu de Bell à tous les coups ?

La physique quantique permet de gagner au jeu de Bell en moyenne 341 fois sur 400, donc bien plus souvent que 3 fois sur 4, c'est-à-dire bien plus souvent que si les boîtes d'Alice et de Bob produisaient leurs choix localement. Cela a tellement fasciné les physiciens que, pendant des générations, ils en ont oublié de se demander pourquoi la physique ne permet pas de gagner au jeu de Bell à coup sûr. Mais oui, tant qu'on y est, pourquoi ne pas gagner à coup sûr ? Pourquoi, si la nature est non locale, ne l'est-elle pas complètement ? Qu'est-ce qui empêcherait une théorie physique de prédire qu'on peut gagner au jeu de Bell à coup sûr ?

Il est intéressant de constater que cette question enfantine n'a été abordée pour la première fois que dans les années 1990 et n'est devenue un thème de recherche qu'au cours de ce siècle. Jusqu'à récemment, la question n'était « que » : comment la nature (ou la physique quantique, si vous préférez) peut-elle être non locale ? Aujourd'hui, beaucoup de publications scientifiques explorent les conséquences d'une non-localité encore plus vaste que la non-localité quantique. On se demande ce qui limite la physique quantique en l'étudiant « depuis l'extérieur », c'est-à-dire dans un contexte plus large que le formalisme quantique.

Le premier jouet théorique que les physiciens ont inventé pour cette exploration est appelé « paire de boîtes PR », des noms de leurs inventeurs Sandu Popescu et Daniel Rohrlich⁵. Pour nous, ces « paires de boîtes PR » ont un air familier : elles ressemblent fortement aux boîtes utilisées par nos amis Alice et Bob pour jouer au jeu de Bell. Simplement, avec des boîtes PR, Alice et Bob gagnent à coup sûr, c'est-à-dire 4 fois sur 4. Personne ne sait fabriquer de telles boîtes – vous ne pouvez donc pas en acheter (contrairement aux boîtes quantiques qui permettent de gagner plus souvent que 3 fois sur 4⁶) –, mais cela n'empêche pas les physiciens de jouer avec : les boîtes PR sont des jouets/outils conceptuels.

Je ne donnerai que deux exemples d'utilisation des boîtes PR. Le premier est la simulation des corrélations quantiques. Nous avons vu que la physique quantique permet de faire bien plus que deux mesures sur un système (voir figure 3, p. 77). Pour le jeu de Bell, deux suffisent, mais les physiciens ont le choix entre une infinité de mesures possibles. Alors, faut-il beaucoup plus de non-localité pour comprendre cette infinité de possibilités ? Sans entrer dans les détails – dont la plupart ne sont de toute façon pas encore connus –, disons qu'avec une seule paire de boîtes PR, on peut simuler toutes les corrélations quantiques correspondant à deux bits quantiques intriqués⁷. C'est très surprenant ! Peut-on simuler toutes les corrélations quantiques à l'aide de boîtes PR ? ou à l'aide d'autres boîtes capables de produire des corrélations simples, sortes de corrélations de base, sans permettre de communication sans transmission ? Mystère.

Un deuxième exemple d'utilisation des boîtes PR relève du domaine de la théorie de la complexité des communications⁸. Le but est de limiter le nombre de bits qui doivent être communiqués pour réaliser certaines tâches. On peut montrer que l'intrication quantique ne permet pas de diminuer le nombre de bits à communiquer. Par contre, si l'on disposait de boîtes PR, on pourrait réduire ce nombre, pour une grande classe de problèmes, à un seul bit ! Bref, on pourrait rendre triviale la complexité des communications. C'est un peu abstrait, mais ce serait extraordinaire : un seul bit au lieu de milliards ! Hélas, les boîtes PR n'existent pas. Et peut-être n'existent-elles pas précisément pour éviter de rendre trivial le problème de la complexité des communications ? C'est en tout cas l'avis d'une large majorité des théoriciens de l'information pour qui trivialisier la complexité des communications est aussi improbable que réaliser des vitesses supraluminiques pour les physiciens. Alors, tient-on là une explication du fait que la physique quantique ne permet pas de gagner à coup sûr au jeu de Bell ? Peut-être bien. Mais le problème n'est pas encore entièrement résolu. On peut imaginer des boîtes PR suffisamment bruitées pour ne pas trivialisier la complexité des communications, mais qui permettent quand même encore de gagner au jeu de Bell plus souvent que ne l'autorise la physique quantique⁹.

Voilà. Au risque de vous avoir perdu dans la complexité des explications, j'espère vous avoir au moins fait partager un peu de l'excitation du chercheur que je suis, l'excitation de la recherche telle qu'elle se pratique actuellement. Pour le plaisir je vous présente encore trois sujets de recherche très actuels ; si vous ne comprenez pas tout, ce n'est pas grave, le but est simplement que demain nous en comprenions un peu plus qu'hier.

Non-localité à plus de deux parties

Le vrai hasard peut se manifester en deux endroits. Peut-il également se manifester en trois endroits, voire en mille endroits ? La réponse n'est pas évidente, car il se pourrait que les corrélations quantiques à trois parties puissent toutes s'expliquer comme combinaisons de hasard non local à deux parties. Aujourd'hui, on sait que ce n'est pas le cas, qu'il existe des corrélations quantiques qui requièrent un hasard capable de se manifester en d'innombrables lieux. Il n'en reste pas moins que la non-localité à beaucoup de parties est encore peu explorée¹⁰.

Un cas particulièrement intéressant est celui où plusieurs paires de systèmes sont intriquées (par exemple A-B et C-D) et où des mesures jointes, comme celles utilisées en téléportation quantique (chapitre 8), sont effectuées sur des systèmes appartenant à des paires différentes (par exemple sur B et C). Il est naturel de supposer que les différentes paires intriquées sont indépendantes les unes des autres. S'il y a n paires, on parle de n -localité ; cela ouvre tout un champ de recherche à explorer qui combine les deux faces de l'intrication, celle d'états non séparables et celle de mesures jointes¹¹.

Qui tient la comptabilité de qui est intriqué avec qui ? Où est stockée l'information des lieux où un hasard non local peut se manifester ? Y a-t-il des « anges » qui maîtrisent un énorme espace mathématique, dit espace de Hilbert, qui comptabilise tout cela ? Il ne semble pas que cette information existe dans notre espace à

trois dimensions. Malgré le sérieux de cette question enfantine, elle n'a encore presque pas reçu d'attention.

Laissez-moi encore vous parler brièvement d'un champ de recherche très actuel : que peut-on prédire à l'aide de la non-localité sans utiliser l'artillerie mathématique de la physique quantique ? Au chapitre 4 nous avons vu que le théorème de non-clonage peut être entièrement démontré. De même, la base des applications comme les générateurs de nombres aléatoires et de la cryptographie quantique du chapitre 7. On peut même retrouver certains aspects des relations d'incertitude d'Heisenberg¹². Par contre, aujourd'hui on ne sait pas présenter la téléportation quantique uniquement à l'aide de boîtes du genre de celles utilisées dans le jeu de Bell ; la difficulté réside dans les mesures jointes dont on ne sait pas capter l'essentiel hors du cadre mathématique de la physique quantique. L'importance de cette recherche vient d'être reconnue par l'Europe qui a lancé le programme DIQIP¹³ qui regroupe des chercheurs de six pays.

Le « théorème du libre arbitre »

Maintenant que toute explication locale est exclue, il est naturel de se demander si l'on ne pourrait pas trouver une explication non locale déterministe. À défaut de sauver la localité, on sauverait au moins le déterminisme. Nous allons brièvement considérer l'hypothèse de variables non locales déterministes, c'est-à-dire qui déterminent complètement les résultats de n'importe quelle mesure.

A priori, cela semble possible : comme la théorie quantique prédit des probabilités, on peut penser qu'il suffira ensuite d'un mélange statistique de ces variables déterministes pour reproduire les probabilités quantiques. D'ailleurs, c'est ainsi que fonctionnent les programmes de simulation de phénomènes quantiques qu'on peut acheter dans le commerce et que nous montrons à nos étudiants. Alors, cela marche-t-il ?

Rappelons-nous que, dans le cas de deux événements distants dans l'espace, la chronologie peut dépendre du référentiel dans

lequel on décrit ces deux événements. Des variables additionnelles non locales déterministes ne sont donc intéressantes (au-delà d'illustrations de phénomènes quantiques sur un écran d'ordinateur) que si elles font les mêmes prédictions dans tous les référentiels. De telles variables sont dites covariantes. Nous allons voir que cela est impossible¹⁴, donc qu'il n'existe pas de variables non locales déterministes covariantes : le déterminisme est donc bel et bien définitivement mort !

Pour prouver que ces variables non déterministes n'existent pas, nous devons supposer qu'Alice et Bob jouissent du libre arbitre. Ainsi, certains en concluent que si nous, êtres humains, jouissons de libre arbitre, alors les particules quantiques, électrons, photons, atomes, etc., doivent nécessairement aussi en jouir. Cette façon frappante de présenter ce résultat est due à deux Américains (qui s'y connaissent en marketing !), John Conway et Simon Kochen, qui parlent du théorème du « libre arbitre¹⁵ ».

Nous allons à nouveau raisonner par l'absurde. Cette démonstration est un peu complexe ; donc si vous vous y perdez, passez directement à la conclusion.

Imaginons donc Alice et Bob en train de jouer au jeu de Bell et étudions cette situation depuis un référentiel dans lequel Alice pousse sa manette un peu avant Bob. Notons k la variable non locale qui, par hypothèse, détermine les résultats produits par les boîtes d'Alice et Bob. Donc, le résultat a d'Alice dépend de cette variable k et de son choix x : $a = F_{AB}(k, x)$, où F_{AB} est une fonction. Puis, vu de ce référentiel, Bob pousse sa manette, son résultat b peut donc dépendre de la variable k et de son choix y , mais aussi du choix x d'Alice : $b = S_{AB}(k, x, y)$. C'est ici qu'on voit que la variable k est non locale¹⁶ : le résultat de Bob peut dépendre du choix d'Alice. Notez que les notations F_{AB} et S_{AB} signifient *first* (premier) et *second* (deuxième) dans l'ordre chronologique AB .

Étudions maintenant cette même situation depuis un autre référentiel, un référentiel tel que maintenant Bob pousse sa manette légèrement avant Alice. Par exemple, ce deuxième référentiel est lié à une fusée qui se déplace rapidement d'Alice vers Bob. Dans ce cas le résultat b de Bob ne dépend que de la variable k et de son

choix y : $b = F_{BA}(k, y)$. Par contre, le résultat a d'Alice peut maintenant dépendre de la variable non locale k , de son choix x et du choix de Bob y : $a = S_{BA}(k, x, y)$. À nouveau les notations F_{BA} et S_{BA} signifient *first* et *second* dans l'ordre chronologique BA .

Mais le résultat a d'Alice ne peut pas dépendre du référentiel depuis lequel on décrit l'expérience (le jeu). Donc on doit toujours avoir $a = F_{AB}(k, x) = S_{BA}(k, x, y)$. Cette dernière égalité ne peut être satisfaite que si S_{BA} ne dépend en fait pas de y , donc que le résultat d'Alice ne dépend pas du choix de Bob. Et, de même, le résultat de Bob ne peut pas dépendre du choix d'Alice. Mais c'est là la condition de localité comme Bell l'a formulée en 1964 : la boîte d'Alice produit son résultat localement, de même pour la boîte de Bob. Dans ce cas, comme nous l'avons vu, Alice et Bob ne peuvent pas gagner au jeu de Bell plus souvent que 3 fois sur 4. Donc, s'ils gagnent plus souvent que 3 fois sur 4, cela exclut aussi l'existence de variables non locales déterministes et covariantes.

En résumé, il ne reste plus que la possibilité de variables non locales non déterministes. C'est ainsi que la théorie quantique décrit le jeu de Bell. Notez qu'ici « non déterministe » est à nouveau un qualificatif négatif : il ne dit pas ce que sont ces variables, ni comment ces variables ou ces modèles décrivent le jeu de Bell, il n'affirme que le fait que ce n'est pas d'une façon déterministe. En particulier, non déterministe ne veut pas dire probabiliste au sens des probabilités usuelles : ce n'est pas un mélange statistique de cas déterministes (les deux articles¹⁷ illustrent bien cette recherche).

Une influence cachée ?

Je ne résiste pas à la tentation de vous présenter un dernier résultat tout récent, même s'il est à nouveau négatif. Afin de sauver la localité, c'est-à-dire de sauver l'idée que les choses et influences se propagent continûment de proche en proche, sans saut ni rupture, idée tellement ancrée en nous qu'il est très difficile de s'en affranchir, il est fort tentant d'imaginer qu'Alice (ou sa boîte) influence Bob d'une façon subtile et cachée à nos yeux de physiciens

du début du xxi^{e} siècle. Ou que Bob influence Alice, suivant lequel effectue son choix en premier. Comme cette chronologie dépend d'un choix arbitraire de référentiel, il est tentant d'imaginer qu'il existe un référentiel privilégié qui détermine une fois pour toutes la chronologie de tous les événements. On a vu que l'expérience permet d'établir une limite inférieure à la vitesse d'une telle influence (chapitre 9). Mais ne se pourrait-il pas que l'apparente non-localité soit due à une influence se propageant continûment de proche en proche d'Alice à Bob à une vitesse gigantesque définie dans un référentiel privilégié que la physique d'aujourd'hui n'a pas encore identifié ? Selon cette hypothèse, si l'influence arrive à temps, les corrélations observées sont celles prédites par la théorie quantique ; en revanche, si l'influence n'arrive pas à temps, alors les corrélations sont nécessairement locales, c'est-à-dire qu'elles ne permettent pas de gagner au jeu de Bell. Une telle hypothèse ne respecte pas l'esprit de la relativité d'Einstein, mais elle n'est en contradiction avec aucun test expérimental de cette relativité. Bref, cette hypothèse entretient avec la relativité une coexistence pacifique, tout comme le font les corrélations quantiques non locales qui permettent de gagner au jeu de Bell.

A priori, il semble impossible d'exclure une telle explication, tout au mieux peut-on effectuer des expériences comme celle décrite au chapitre 9 qui permet de trouver une limite inférieure à la vitesse de cette influence hypothétique. Mais... soyons malins.

L'hypothèse d'influences se propageant plus rapidement que la lumière implique-t-elle forcément qu'on puisse communiquer plus rapidement que la lumière ? On pourrait imaginer que ces influences nous restent à jamais cachées. Cela ne semble pas très physique, mais il est naturel de supposer que tant que les physiciens ne maîtrisent pas ces hypothétiques influences, ils ne peuvent pas s'en servir pour communiquer plus rapidement que la lumière.

Étonnamment, cette simple hypothèse selon laquelle on ne peut pas communiquer plus vite que la lumière sans maîtriser ces influences, suffit à démontrer que de telles influences ne peuvent pas exister ! Ce résultat a été obtenu durant la rédaction de ce livre par mon étudiant Jean-Daniel Bancal, un postdoctorant de Malaisie,

Yeong-Cherng Liang, et trois de mes anciens collaborateurs : Stefano Pironio actuellement à Bruxelles, Antonia Acin à Barcelone, Valerio Scarani à Singapour, et moi-même. Une magnifique aventure commencée il y a plus de dix ans. Puisqu'il nous a fallu dix ans pour trouver la réponse, ne vous étonnez pas si elle vous paraît compliquée. Je vais essayer de vous la résumer, mais vous pouvez tout aussi bien sauter directement à la conclusion ; rappelez-vous simplement que même l'hypothèse d'influences se propageant à une vitesse finie quelconque, plus rapide que la lumière mais néanmoins finie, même cette hypothèse extrême peut être exclue. La nature est définitivement non locale.

L'hypothèse d'influences supraluminiques permet de reproduire tous les résultats expérimentaux entre deux partenaires, comme nos amis Alice et Bob. En effet, aucune synchronisation expérimentale n'étant parfaite, on peut toujours supposer que la vitesse de ces influences est suffisamment grande pour corrélérer deux événements. Avec trois partenaires, la question est encore ouverte. Mais, avec quatre partenaires, appelons-les A, B, C et D, nous avons trouvé l'argument suivant. Imaginons que dans le référentiel privilégié A effectue sa mesure en premier, puis D, puis quasi simultanément B et C, de telle sorte que l'influence de A arrive à temps chez les trois autres partenaires et que l'influence de D arrive à temps chez B et C, mais que ces deux derniers ne puissent pas s'influencer mutuellement. Dans un tel cas de figure, les corrélations ABD et ACD sont, selon l'hypothèse des influences cachées, celles prédites par la théorie quantique. En revanche, la corrélation BC est locale. Or nous avons trouvé une inégalité surprenante¹⁸, qui est satisfaite par toutes les corrélations à quatre parties où BC est locale et qui ne permet pas de communication sans transmission. De plus, cette inégalité ne fait intervenir que des termes impliquant des corrélations entre ABD et entre ACD. Chacun de ces triplets de parties est relié par l'hypothétique influence cachée, par exemple A influence D qui influence B. Ainsi, dans la configuration ci-dessus, tout modèle à influences cachées à vitesse finie prédit pour cette inégalité la même valeur que la prédiction quantique. Or la prédiction quantique viole notre inégalité. D'où l'on conclut que tout

modèle d'influence à vitesse finie produit nécessairement des corrélations permettant une communication supraluminique.

Le résultat esquissé ci-dessus clôt la boucle du programme initié par John Bell : expliquer les corrélations quantiques selon un principe de continuité, c'est-à-dire où tout se propage continûment de proche en proche. La figure 11 illustre cette boucle. Encore une fois, la conclusion qui s'impose est que des événements distants sont reliés d'une façon discontinue, donc que la nature est non locale.

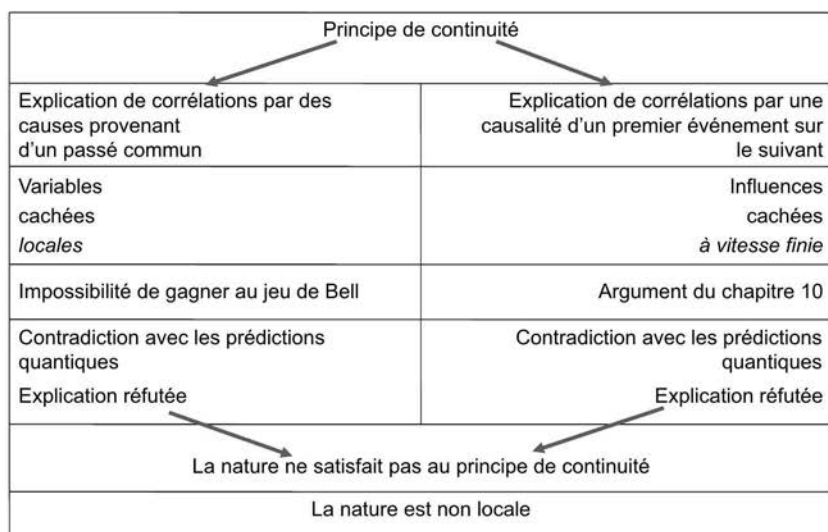


Figure 11. Illustration du programme de John Bell. Aujourd'hui la boucle est bouclée. Il n'existe aucune explication locale à certaines corrélations que la physique quantique permet de produire. La nature est non locale. Dieu joue aux dés pour permettre une forme de non-localité excluant toute communication sans transmission.

CONCLUSION

Nous voici au terme de ce livre. Je vous avais prévenu : vous n'avez pas tout compris. Personne ne sait pourquoi la physique quantique est non locale. En revanche, vous avez compris que la nature n'est pas déterministe et qu'elle est capable de réels actes de pure création : elle peut produire du vrai hasard. De plus, une fois qu'on a bien assimilé qu'il s'agit de vrai hasard et pas seulement de quelque chose de préexistant qui nous était caché, on comprend que rien n'empêche ce hasard de se manifester en plusieurs endroits, sans que cela implique une communication entre ces endroits.

Ces endroits ne sont pas arbitraires, mais doivent préalablement être intriqués. L'intrication est portée par des objets quantiques, photons ou électrons par exemple, et ces objets ne se propagent qu'à des vitesses finies, inférieures ou égales à celle de la lumière. Dans ce sens, les notions de distance et d'espace demeurent pertinentes, bien que le hasard non local puisse se manifester en des lieux arbitrairement éloignés.

J'ai écrit dans ce livre que les corrélations non locales semblent surgir de l'extérieur de l'espace et du temps dans le sens qu'aucune histoire se déroulant dans l'espace au cours du temps ne peut raconter comment la nature produit de telles corrélations. Effectivement, il est vrai qu'aucune histoire ordinaire, c'est-à-dire racontant comment les choses et les événements s'influencent, se déplacent et se propagent continûment de proche en proche ne peut décrire la survenue de corrélations non locales. Mais alors, est-ce que les physiciens vont

renoncer à la grande entreprise de « comprendre la nature » ? Je suis toujours étonné de constater que beaucoup de physiciens ne semblent pas concernés par cette question ; ils semblent se contenter de la possibilité de calculer. Peut-être que pour ces physiciens, les ordinateurs comprennent la nature ?

Pourtant, depuis toujours, c'est la recherche de bonnes explications qui caractérise la science.

Jusqu'à l'avènement de la physique quantique, toutes les corrélations prédites et observées en science ont été expliquées par des chaînes causales se propageant de proche en proche, donc par des explications locales. Toutes ces explications préquantiques sont également caractérisées par le déterminisme. En principe, tout est déterminé par les conditions initiales. Bien qu'en pratique il soit souvent impossible de suivre en détail ces chaînes causales déterministes, les physiciens ne doutaient pas de leur existence. La physique quantique nous oblige à formuler de nouvelles bonnes explications pour les corrélations non locales.

Mais alors, comment expliquer/raconter la non-localité ? Avec nos outils conceptuels préquantiques, cela est impossible. Il nous faut donc agrandir la boîte à outils. En ajoutant par exemple la possibilité de raconter du hasard non local produit par des objets intriqués.

Imaginons une sorte de dé conceptuel qui, un peu comme les boîtes PR que nous avons vues au chapitre 10, peut être « lancé » aussi bien par Alice que par Bob et dont le résultat aléatoire est aussi bien présent chez l'un que chez l'autre. Ce dé non local est lancé par le choix d'Alice ou de Bob d'effectuer une mesure, donc par la poussée de la manette sur la boîte d'Alice ou sur celle de Bob. Un peu plus formellement, le processus aléatoire peut être initié soit par Alice en choisissant son input x , soit par Bob qui choisit un y ; les résultats a et b sont aléatoires, mais avec la promesse qu'ils « s'attirent » de façon à favoriser la corrélation à la base du jeu de Bell : $a + b = x \cdot y$. Si l'on s'autorise ce genre de mode d'explication, alors on peut comprendre la non-localité, un peu comme on a fini par comprendre l'attraction universelle en acceptant de raconter que toute masse, en particulier tout humain, est

attiré par la Terre. Évidemment, pour l'attraction universelle, on a l'exemple familier des aimants qui collent sur nos frigos. Si un jour la cryptographie quantique devient familière, nous pourrions dire à nos enfants : « Mais oui, la non-localité c'est comme en cryptographie quantique, ce n'est pas Alice qui envoie une clé secrète à Bob, ni Bob qui envoie une clé secrète à Alice, c'est Alice et Bob qui, à distance, produisent ensemble une clé secrète qui se matérialise simultanément des deux côtés. »

Est-ce la seule manière de raconter du hasard non local ? Certains préfèrent parler de « rétrocausalité », le choix d'Alice rétroagissant sur la source d'intrication, qui à son tour agit sur le système quantique de Bob. La rétrocausalité agit vers le passé, elle se propage de proche en proche, mais vers le passé. Je n'ai pas de doute que la non-localité de même que la relativité mettent à mal notre concept familier du temps, mais de là à imaginer une causalité inverse qui « remonte » le temps !

Je mentionne cette approche pour illustrer la recherche d'aujourd'hui. Vous aurez compris que je préfère mon mode d'explication basé sur le concept de hasard non local qui peut se manifester en plusieurs lieux, indépendamment de la distance, mais il est bien possible que l'avenir me surprenne et que les générations futures utilisent un tout autre mode explicatif. Une chose est cependant certaine : on racontera la non-localité ; les physiciens n'abandonneront jamais la grande entreprise et inventeront une explication.

Le hasard non local est donc un nouveau mode d'explication à ajouter à notre boîte à outils conceptuels, outils nécessaires à la compréhension du monde. Et il s'agit d'une réelle révolution conceptuelle ! Comme la théorie quantique prédit l'existence de corrélations non locales, il faudra bien s'y faire et intégrer ce nouveau mode d'explication.

La non-localité quantique a mis très longtemps à s'imposer comme concept central en physique. Encore aujourd'hui, bien des physiciens refusent la terminologie de « non local¹ ». Pourtant, Einstein et Schrödinger, entre autres, ont soutenu de tout leur poids que cet aspect de la théorie quantique est la caractéristique principale

du monde quantique, et ce dès 1935. Il semble que ce que tous ces physiciens suspicieux n'ont pas saisi est que la non-localité quantique ne permet pas la communication : rien ne va d'Alice à Bob, ni de Bob à Alice. Simplement – façon de parler –, un événement aléatoire se manifeste en plusieurs endroits, d'une façon non descriptible localement, donc d'une façon non locale. Einstein a eu tort de parler d'« action non locale », il n'y a pas d'action d'Alice sur Bob, ni de Bob sur Alice. Mais il avait parfaitement raison d'insister sur cet aspect de la théorie quantique, car c'est celui qui distingue le mieux la physique quantique de la physique classique. Aujourd'hui, quand on veut être certain qu'un système est bien quantique, on doit montrer qu'on peut l'utiliser pour produire des corrélations non locales, donc qu'on pourrait l'utiliser pour gagner au jeu de Bell : aujourd'hui, la violation d'une inégalité de Bell est la signature du quantique.

Il n'empêche que notre intuition en prend un sérieux coup. Les technologies quantiques en plein développement nous rendront-elles un jour intuitives la physique quantique et sa non-localité ? Je parie que oui. Commençons déjà par abandonner la vieille terminologie de « mécanique quantique », pour celle de « physique quantique » : cette physique n'a justement rien de mécanique !

Résumons encore une fois l'essentiel. Nous avons vu que les corrélations non locales et l'existence du vrai hasard sont intimement liées. Sans vrai hasard, les corrélations non locales permettraient forcément une communication sans transmission (donc à une vitesse arbitraire). Ainsi, le concept central de ce livre implique forcément l'existence du vrai hasard, donc la fin du déterminisme. Réciproquement, une fois l'existence du vrai hasard acceptée, l'existence de corrélations non locales ne paraît plus aussi insensée que la physique classique, avec son déterminisme, nous l'a fait croire. En effet, si la nature est capable de vrai hasard, pourquoi les corrélations observées dans la nature devraient-elles être limitées à des corrélations locales ?

Il n'est pas possible de surestimer l'impact de la non-localité sur la métaphysique, c'est-à-dire sur la vision du monde soutenue par la physique moderne. Il a fallu des siècles pour que s'impose

en Europe la vision atomiste, celle d'un monde constitué d'innombrables atomes, sorte de petites billes invisibles dont les assemblages constituent tous les objets et dont les mouvements erratiques produisent la sensation de chaleur et fournissent l'énergie des machines à vapeur, bases de la révolution industrielle. À l'époque, en Chine cette vision semble ne pas avoir emporté l'adhésion des intellectuels, car, pensaient-ils, dans un monde plein de vide entre les atomes « nous ne pourrions voir et entendre, car la perception des sens serait gênée par les espaces vides² ». Il semble même que dans la métaphysique chinoise antique, l'action à distance soit toute naturelle, et ferait partie d'une harmonie universelle reliant toutes choses. La physique quantique ne soutient pas une telle vision holistique du monde. En physique quantique, tout n'est pas intriqué avec tout, et seuls de rares événements sont corrélés d'une façon non locale. Surtout, et encore une fois, il n'y a pas une cause ici qui agit là-bas. L'intrication est une « cause probabiliste » qui peut manifester ses effets en plusieurs endroits, sans permettre de communication à distance. L'intrication détermine la tendance naturelle des objets de produire telles ou telles réponses corrélées à des questions. Ces réponses ne sont pas prédéterminées, elles ne sont pas inscrites dans l'état de l'objet, mais la propension à produire tels ou tels résultats est inscrite dans l'état de l'objet.

Personnellement, je ne trouve pas extraordinaire qu'un objet quantique ne possède pas en lui toutes les réponses à toutes les questions que les physiciens peuvent lui poser, mais qu'il possède seulement une propension à produire ces réponses. Je ne trouve pas difficile à admettre que le monde n'est pas déterministe. Ce monde plein de propensions et de hasards suivant des lois bien définies est, à mes yeux, beaucoup plus intéressant qu'un monde où tout serait parfaitement prédéterminé depuis la nuit des temps.

Parions qu'il y a encore beaucoup à en apprendre. En particulier, nous ne comprenons toujours pas comment rendre cela compatible avec la relativité d'Einstein. Nous n'en comprenons pas non plus toutes la structure mathématique, ni toute la puissance d'applications en traitement d'information, ni – c'est peut-être le plus

surprenant – les limites : pourquoi la physique quantique n'autorise-t-elle pas davantage de non-localité ?

Cette dernière question illustre bien le chemin parcouru depuis Einstein, Schrödinger et Bell. À l'époque, la question était : « Est-ce que les corrélations non locales prédites par la théorie quantique existent vraiment ? » Aujourd'hui, plus aucun physicien n'en doute ; la question est maintenant d'intégrer ce fait dans une théorie relativiste et de comprendre les limites de la non-localité. Il s'agit donc d'étudier la non-localité quantique depuis l'extérieur de la théorie quantique. Nous y travaillons.

NOTES

PRÉFACE

1. Pour une description un peu plus détaillée, voir par exemple E. Brézin *et al.*, « Une nouvelle révolution quantique », *Demain la physique*, chapitre 5, Odile Jacob, 2005.

2. « [...] *it is fair to state that we are not experimenting with single particles, any more than we can raise Ichthyosauria in the zoo* », in E. Schrödinger, « Are there quantum jumps » (Les sauts quantiques existent-ils ?), *The British Journal for the Philosophy of Sciences*, vol. III, p. 240.

3. Oublions la solution désespérée consistant à rejeter le libre arbitre, qui ferait des êtres humains des marionnettes dirigées par on ne sait quel déterminisme laplacien.

4. Nicolas Gisin a été le premier lauréat, en 2009, du prestigieux prix John Stewart Bell, attribué à des recherches sur des problèmes fondamentaux en mécanique quantique et à leurs applications.

INTRODUCTION

1. Quand Alain Aspect, jeune chercheur débutant, est allé voir John Bell pour lui proposer de réaliser son expérience, Bell lui a répondu : « Avez-vous un poste permanent ? » L'expérimenté John Bell savait bien qu'il était dangereux pour un jeune de travailler sur ce sujet méprisé par l'establishment scientifique.

Chapitre 1

APÉRITIFS

1. Cohen B. et Schofield R. E. (dir.), *Isaac Newton Papers & Letters on Natural Philosophy and Related Documents*, Harvard University Press, 1958. Traduction de François Lurçat dans *De la science à l'ignorance*, Éditions du Rocher, 2003, p. 46.

2. Gilder L., *The Age of Entanglement : When Quantum Physics Was Reborn*, Alfred A. Knopf, 2008.

Chapitre 2

CORRÉLATIONS LOCALES ET NON LOCALES

1. Bell J. S., *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, 1987, p. 152.

2. On sait que dans un groupe de personnes, si l'un bâille, cela déclenche involontairement un bâillement chez d'autres. C'est un exemple d'influence inconsciente entre personnes. Mais il faut évidemment que la deuxième personne voie la première bâiller. Ainsi, cette influence ne peut pas se propager plus rapidement que la lumière.

3. Remarquez que le même raisonnement s'applique aussi au cas où l'un des deux est sérieux tandis que l'autre fait n'importe quoi. Dans ce cas aussi, les taux de succès seront de 1/2 et le score final de 2.

4. Combien de fois au cours de mes études le bon mais quelque peu turbulent étudiant que j'étais n'a-t-il demandé à ses profs de quantique des explications ? Et combien de fois ai-je dû entendre que la physique quantique ne se comprend pas car elle utilise des mathématiques trop complexes !

5. Ici, « programme » est à prendre au sens abstrait de *quels résultats sont produits par quelles données* ? Un programme abstrait peut évidemment être écrit de multiples façons, dans divers langages de programmation, avec éventuellement des tas de lignes superflues, de sorte qu'il peut être difficile de remarquer que deux programmes écrits différemment correspondent en fait au même programme abstrait.

6. Plus précisément, c'est la plus simple de toute la famille des inégalités de Bell (équivalente à l'inégalité CHSH selon les initiales de ses inventeurs [J. F. Clauser, M. A. Horne, A. Shimony et R. A. Holt, « Proposed experiment to test local hidden-variable theories », *Phys. Rev. Lett.*, 1969, 23, 880]). Les autres inégalités correspondent aux cas où il y a davantage de choix possibles ou davantage de résultats possibles ou davantage de joueurs.

7. L'Américain John Clauser a réussi un exploit similaire quelques années auparavant, mais les boîtes utilisées n'excluaient pas la possibilité d'échanger des informations entre elles. De plus, elles ne pouvaient donner qu'un résultat (par exemple 0), l'autre résultat (1) étant obtenu par des mesures indirectes.

8. Il ne faut pas confondre l'hypothèse d'une « communication subtile » entre les deux boîtes dans le but de gagner au jeu de Bell avec la possibilité pour Alice et Bob d'utiliser les corrélations produites par leurs boîtes pour communiquer entre eux. La première serait une sorte de communication cachée que nous appellerons « influence ». La seconde permettrait à Alice et Bob de communiquer sans avoir besoin de comprendre ni de maîtriser le fonctionnement interne des boîtes.

9. Formellement une corrélation $p(a,b|x,y)$ ne permet pas de communiquer si les marginales ne dépendent pas de l'input de l'autre partie : $\sum_b p(a,b|x,y)=p(a|x)$ et $\sum_a p(a,b|x,y)=p(b|y)$.

10. Quand on appuie sur un élément piézoélectrique, une tension apparaît ; quand on le soumet à une tension électrique, l'élément se comprime. Les deux effets sont indissociables. Une application parmi les plus familières est l'allume-gaz : la pression exercée produit une tension électrique qui se décharge brutalement sous forme d'étincelles. Le « saphir » des platines disques en est une autre.

11. Pour les spécialistes, précisons que ce n'est pas tout le cristal d'Alice qui est intriqué avec celui de Bob, mais que ces cristaux contiennent chacun quelques milliards d'ions de terres rares. Quelques excitations collectives de ces ions dans le cristal d'Alice sont intriquées avec des excitations similaires des ions du cristal de Bob (Christoph Clausen, Imam Usmani, Félix Bussiès, Nicolas Sangouard, Mikael Afzelius, Hugues de Riedmatten et Nicolas Gisin, « Quantum storage of photonic entanglement in a crystal », *Nature*, janvier 2011, 469, p. 508-511).

Chapitre 3

NON-LOCALITÉ ET VRAI HASARD

1. En ce sens, l'image de photons-jumeaux souvent utilisée pour parler des paires de photons intriqués qui permettent de gagner au jeu de Bell est bien mauvaise.

2. Je n'affirme pas que l'explication par un hasard non local est complète et définitive. Par contre, je n'hésite pas à affirmer que les scientifiques ne renonceront jamais à trouver une explication et que toute explication est nécessairement non locale. L'explication que l'histoire retiendra sera celle qui permettra d'aller au-delà de la physique d'aujourd'hui, celle qui permettra de découvrir une nouvelle physique qui englobera la théorie quantique comme une approximation. Cette nouvelle physique permettra de gagner au jeu de Bell, sinon elle ne serait pas en accord avec les résultats expérimentaux ; donc elle sera elle aussi non locale.

3. En physique classique, le résultat de toute mesure est prédéterminé : il est en quelque sorte inscrit dans l'état physique du système mesuré. Les probabilités n'interviennent que par ignorance de l'état physique exact ; cette ignorance oblige le scientifique de se contenter de moyenne statistique et de calculs de probabilité obéissant aux axiomes de Kolmogorov. En physique quantique, le résultat d'une mesure n'est pas prédéterminé, même si l'état du système est parfaitement connu. Seule la propension que tel ou tel résultat se manifeste est inscrite dans l'état physique du système mesuré. Ces propensions ne suivent pas les mêmes règles et ne satisfont pas aux axiomes de Kolmogorov. Notez que certains résultats en physique quantique sont quand

même prédéterminés. La structure de la théorie mathématique de la physique quantique (espace de Hilbert) est telle que pour les états n'admettant aucune ignorance (les états dits « purs »), l'ensemble des résultats prédéterminés caractérise univoquement la propension de tous les autres résultats possibles. En ce sens, les propensions de la physique quantique sont une généralisation logique du déterminisme classique (N. Gisin, « Propensities in a non-deterministic physics », *Synthesis*, 1991, 89, p. 287-297).

4. Ferrenberg A. M., Landau D. P. et Wong Y. J., « Monte Carlo simulations : Hidden errors from "good" random number generators », *Phys. Rev. Lett.*, 1992, 69, 3382. Ossola G., Sokal A. D., « Systematic errors due to linear congruential random-number generators with the Swendsen-Wang algorithm : A warning », *Phys. Rev. E*, 2004, 70, 027701.

5. Popescu S. et Rohrlich D., « Nonlocality as an Axiom », *Found. Phys.*, 1994, 24, p. 379.

Chapitre 4

LE CLONAGE QUANTIQUE EST IMPOSSIBLE

1. Pour des raisons historiques, les physiciens parlent souvent d'« incertitude quantique ». Mais comme « (in)certitude » se réfère plutôt à un observateur et non au système physique, on préfère aujourd'hui « indéterminisme quantique » (voir encadré 8, p. 64.).

2. On peut démontrer que Bob devine juste le choix d'Alice plus souvent qu'une fois sur deux très précisément si Alice et Bob gagnent au jeu de Bell plus souvent que 3 fois sur 4.

3. Wigner E. P., « The probability of the existence of a selfreproducing unit », in *The Logic of Personal Knowledge : Essays Presented to Michael Polanyi on his Seventieth Birthday*, Routledge & Kegan Paul, 1961. Repris dans Wigner E. P., *Symmetries and Reflections*, Indiana University Press, 1967, et dans *The Collected Works of Eugene Paul Wigner*, Springer-Verlag, 1997, part. A, vol. III.

4. C'est comme si on codait une information dans la position d'un électron, sans se préoccuper de sa vitesse ; dans ce cas, la position peut être copiée, cela perturbe la vitesse de l'électron, mais peu importe si la vitesse ne porte aucune information.

5. Gisin N., « Quantum cloning without signalling », *Physics Letters A*, 1998, 242, p. 1-3.

6. Simon C., Weihs G. et Zeilinger A., « Quantum cloning and signaling », *Acta Phys. Slov.*, 1999, 49, p. 755-760.

7. Terhal B. M., Doherty A. C. et Schwab D., « Local hidden variable theories for quantum states », *Phys. Rev. Lett.*, 2003, 90, p. 157903.

Chapitre 5

L'INTRICATION QUANTIQUE

1. Schrödinger E., « Discussion of probability relations between separated systems », *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1935, 31, p. 55.
2. Pour une présentation plus élaborée, voir Scarani V., *Initiation à la physique quantique*, Vuibert, 2003.
3. Rae A., *Quantum Physics : Illusion or Reality ?*, Cambridge University Press, 1986. Ortolí S. et Pharabod J.-P., *La Cantique des quantiques*, La Découverte, 1985. Gilder L., *The Age of Entanglement*, *op. cit.*
4. Tel que mesuré par une balance. Mais pas notre masse, seule la force d'attraction que la Terre et la Lune exercent sur nous serait affectée.
5. La polarisation est déterminée par la vibration du champ électrique associé à tout photon. Si le photon est bien polarisé, cette vibration est confinée dans une orientation précise. Cette orientation détermine l'état de polarisation du photon. Elle est reliée à la direction de possibles mesures avec un facteur 2 dans les angles, facteur qui mériterait à lui seul une belle histoire.
6. Il existe une infinité d'états intriqués. Ici, je considère l'état que les physiciens dénotent ϕ^+ et des mesures dans le plan xz.
7. Certains préfèrent parler de variables cachées locales, mais le fait qu'elles soient cachées ou non ne change rien à l'affaire.
8. Shimony A., in Kamefuchi S. *et al.* (éd.), *Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology*, Physical Society of Japan, Tokyo, 1983.

Chapitre 6

EXPÉRIENCE

1. Pour créer un photon vert, il faut que, par chance, deux photons infrarouges soient simultanément présents au même endroit dans le cristal. La probabilité de cet événement varie avec le carré de l'intensité de la lumière infrarouge.
2. Selon le cristal non linéaire utilisé, ces deux photons n'ont pas nécessairement exactement la même couleur moyenne. Par exemple, l'un peut être infrarouge clair, donc contenir un peu de rouge, et l'autre infrarouge foncé, donc être totalement invisible à nos yeux. Cette différence de couleur et donc d'énergie peut être assez grande, en particulier plus grande que l'indétermination en énergie de chacun de ces photons que nous continuerons néanmoins d'appeler infrarouges. Grâce à cette différence, on peut séparer les deux photons et envoyer, par exemple, le photon infrarouge clair à Alice et le photon infrarouge foncé à Bob. Pour ce faire, on injecte ces photons dans des fibres optiques, les mêmes fibres que celles que vous utilisez quotidiennement lorsque

vous surfez sur Internet, regardez la télévision ou téléphonez. Dans l'expérience réelle, les photons infrarouges sont adaptés aux caractéristiques des fibres optiques : on parle de photons télécom pour dire des photons d'une couleur où la transparence des fibres optiques utilisées en télécommunication est maximale.

3. Si l'on accepte les relations d'incertitude d'Heisenberg et donc que les mesures en physique quantique produisent des résultats au vrai hasard, alors on n'a pas besoin de deux grandeurs physiques, comme l'énergie et l'âge des photons : une seule suffirait pour démontrer la non-localité de la physique quantique. Mais s'il n'existait pas deux grandeurs, alors personne ne croirait au vrai hasard : on supposerait que l'énergie, par exemple, de chaque photon est parfaitement bien déterminée, mais que l'on ignore sa valeur. Ce n'est que grâce au jeu de Bell, jeu qui requiert qu'Alice et Bob puissent faire un choix entre (au moins) deux options, qu'on se convainc de l'existence du vrai hasard et de la validité des relations d'incertitude d'Heisenberg.

4. L'interféromètre permet de retarder la partie « à l'heure » pour la faire coïncider avec la partie « en retard » du même photon. Ainsi, les deux parties du photon infrarouge de chez Bob se rencontrent sur un coupleur en fibre optique (équivalent à un miroir semi-transparent). Le photon a le choix entre les deux sorties de l'interféromètre, chacune étant équipée d'un détecteur de photon. Ainsi, on a de nouveau un résultat binaire. Chacun des deux interféromètres est équipé d'un « modulateur de phase ». En pratique, il s'agit d'un élément qui permet de légèrement allonger la fibre optique, ce qui retarde la partie « à l'heure » des photons infrarouges. Cet allongement est minuscule, inférieur à la longueur d'onde des photons, et donc elle ne remet pas en cause le fait que les deux parties de chaque photon se retrouvent en même temps sur le dernier coupleur de chaque interféromètre. Pour cela, on utilise par exemple un élément piézoélectrique pour étirer un peu la fibre optique. L'essentiel est que les photons aient toujours une chance sur deux d'être détectés par chacun des deux détecteurs. Par contre, la probabilité que les deux photons infrarouges d'une paire soient tous deux détectés par le détecteur du haut, donc que $a=b=0$, dépend de la façon dont on allonge les chemins optiques chez Alice et chez Bob (elle dépend de la somme des phases, diraient les physiciens). Ainsi, la corrélation entre les résultats chez Alice et chez Bob dépend des allongements chez Alice et chez Bob. Formellement, cette forme d'intrication, dite en deux *time-bin*, est équivalente à l'intrication en polarisation (W. Tittel et G. Weihs, « Photonic entanglement for fundamental tests and quantum communication », *Quantum Inform. & Computation*, 2001, 1, p. 3-56) ; elle a l'avantage d'être bien adaptée aux fibres optiques et qu'il est facile d'augmenter le nombre de *time-bin* et ainsi d'explorer des cas avec un nombre de résultats possibles largement supérieur à deux.

5. Tittel W., Brendel J., Zbinden H. et Gisin N., « Violation of Bell inequalities by photons more than 10 km apart », *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 81, p. 3563.

Chapitre 7

APPLICATIONS

1. www.idquantique.com.

2. Pironio S. *et al.*, « Random numbers certified by Bell's theorem », *Nature*, 2010, 464, p. 1021-1024.

3. Intuitivement cela fonctionne ainsi. Imaginons 2 bits $b1$ et $b2$ et un adversaire qui a une probabilité de $\frac{3}{4}$ de deviner correctement chacun de ces bits. Remplaçons ces 2 bits par leur somme (modulo 2, afin que le résultat soit toujours un bit) : $b = b1 + b2$. L'adversaire devine correctement b seulement s'il devine correctement les 2 bits ou s'il se trompe les deux fois ; donc il devine correctement b avec la probabilité $(\frac{3}{4})^2 + (\frac{1}{4})^2 = \frac{5}{8}$ qui est inférieur à $\frac{3}{4}$. Ainsi, Alice et Bob ont augmenté la confidentialité de leur clé au prix d'en avoir perdu la moitié. Des algorithmes plus sophistiqués permettent de faire mieux en perdant nettement moins de la clé originale.

4. Il faut que l'insécurité initiale ne soit pas trop grande, c'est pourquoi les impulsions qu'Alice envoie à Bob doivent être assez faibles pour limiter la fréquence des impulsions multiphoton.

5. Pour plus de détails voir N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel et H. Zbinden, « Quantum cryptography », *Rev. Modern Phys.*, 2002, 74, p. 145-195 ; V. Scarani, H. Bechmann-Pasquinucci, N. Cerf, M. Dusek, N. Lutkenhaus, M. Peev, « The security of practical quantum key distribution », *Rev. Mod. Phys.*, 2009, 81, p. 1301.

Chapitre 8

LA TÉLÉPORTATION QUANTIQUE

1. Voici une petite histoire qui illustre le chemin parcouru depuis le début de la seconde révolution quantique dans les années 1990. En 1983, alors que j'étais jeune postdoc aux États-Unis, un professeur important m'a approché avec un large sourire pour affirmer qu'il m'avait sauvé la vie. Il m'a avoué avoir été le rapporteur pour l'une de mes toutes premières publications scientifiques, dans laquelle j'avais commis le blasphème impardonnable d'écrire qu'en physique quantique il semblait possible « qu'un système disparaisse ici pour réapparaître là-bas ». Aujourd'hui, cela fait penser à la téléportation, mais j'en étais loin : il ne s'agissait que d'une intuition. Mon « sauveur » a accepté pour publication mon papier sous la condition incontournable que le paragraphe blasphématoire soit enlevé. À l'époque, mon affirmation m'aurait valu la réprobation générale ! Combien d'occasions perdues à cause de ces grands

professeurs qui répétaient inlassablement que Bohr avait tout résolu ? Combien de jeunes talents ont quitté la physique ? Et combien de grands professeurs répètent encore aujourd'hui que Bohr a tout résolu ?

2. Bennett C. H., Brassard G., Crepeau C., Jozsa R. et Peres A., « Teleporting an unknown quantum state *via* dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels », *Physical Review Letters*, 1993, 70, p. 1895-1899.

3. C'est ainsi que commence la soumission de notre publication sur la première expérience de téléportation longue distance. Mais les éditeurs de la célèbre revue *Nature* ont refusé une citation aussi ancienne qu'Aristote ! J'ai bien proposé à mes étudiants de renoncer à publier dans *Nature*, mais la pression est trop forte et nous nous sommes soumis aux diktats des éditeurs. I. Marcikic, H. de Riedmatten, W. Tittel, H. Zbinden et N. Gisin, « Long-distance teleportation of qubits at telecommunication wavelengths, I », *Nature*, 2003, 421, p. 509-513 (soumission : arXiv:quant-ph/0301178).

4. Pour un photon avec une polarisation précise il existe un polariseur au travers duquel le photon est certain de passer. Par contre, un photon totalement dépolarisé a toujours une chance sur deux de passer à travers un polariseur, quelle que soit l'orientation de ce polariseur. Dans le premier cas, le photon porte une structure qu'un polariseur peut confirmer, mais dans le deuxième cas la réponse « passe ou ne passe pas » à travers n'importe quel polariseur est toujours de 50-50, donc le photon ne porte aucune structure.

5. Comme nous l'avons vu au chapitre 6, l'énergie d'un photon peut être indéterminée. En fait, il en va de même pour la masse, par exemple d'un condensat de Bose-Einstein. L'important est que la substance, masse ou énergie, soit déjà présente au moins potentiellement chez le destinataire.

6. Une précision pour les physiciens : cela est vrai si l'on téléporte toutes les caractéristiques d'un photon. Si l'on ne téléporte que sa polarisation, alors les photons ne sont indistinguables que si leurs autres caractéristiques, telles que leurs spectres, sont déjà initialement indistinguables.

7. Ici je dois avouer au lecteur qu'il existe beaucoup d'états d'intrication. Jusqu'ici, pour simplifier j'ai toujours parlé de l'intrication qui produit le même résultat pour les mêmes mesures. Mais il existe d'autres états d'intrication. Par exemple, il en existe qui sont tels qu'ils produisent toujours des résultats différents pour les mêmes mesures. Et en fait il en existe encore bien d'autres, mais nous n'en aurons pas besoin. Pour les physiciens : il existe quatre états orthogonaux d'intrication maximale de la polarisation de deux photons ; pour chacun d'eux Bob peut appliquer une rotation (une transformation unitaire) sur la polarisation de son photon telle qu'il retrouve précisément l'état initial du photon d'Alice (toujours sans connaître cet état).

8. Pour cela il faut tourner l'état du photon. Par exemple, si le qubit est codé en polarisation, il faut tourner l'état de polarisation à l'aide de lames biréfringentes.

Chapitre 9

LA NATURE EST-ELLE RÉELLEMENT NON LOCALE ?

1. Qu'un photon soit perdu n'est en principe pas grave, pour autant qu'on le sache avant de lui poser une question (avant de pousser la manette à gauche ou à droite). Sinon, le photon pourrait décider de se « perdre » si la question ne lui convient pas.

2. Rowe M. A. *et al.*, « Experimental violation of Bell's inequalities with efficient detection », *Nature*, 2001, 149, p. 791-794. Matsukevich D. N. *et al.*, « Bell inequality violation with two remote atomic qubits », *Physical Review Letters*, 2008, 100, p. 150404.

3. Une petite précision s'impose pour tous ceux qui s'inquiètent de la relativité : si la lumière n'arrive pas à joindre deux événements dans un référentiel, alors il en est de même pour tous les autres référentiels possibles.

4. Aspect A., Dalibard J. et Roger G., « Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers », *Phys. Rev. Lett.*, 1982, 49, p. 91-94.

5. Weihs G., Jennewein T., Simon C., Weinfurter H. et Zeilinger A., « Violation of Bell's inequality under strict Einstein locality conditions », *Physical Review Letters*, 1998, 81, p. 5039.

6. Tittel W., Brendel J., Zbinden H. et Gisin N., « Violation of Bell inequalities by photons more than 10 km apart », art. cit. Tittel W., Brendel J., Gisin N. et Zbinden H., « Long-distance Bell-type tests using energy-time entangled photons », *Physical Review A*, 1999, 59, p. 4150.

7. Gisin N. et Zbinden H., « Bell inequality and the locality loophole : Active versus passive switches », *Physics Letters A*, 1999, 264, p. 103-107.

8. « *It is as if there is some kind of conspiracy, that something is going on behind the scenes which is not allowed to appear on the scenes.* » P. C. W. Davies et J. R. Brown (dir.), *The Ghost in the Atom*, Cambridge University Press, 1986, p. 48-50.

9. Lineweaver C. *et al.*, « The dipole observed in the COBE DMR 4 year data », *Astrophys. J.*, 1996, 38, p. 470. <http://pdg.lbl.gov>.

10. Salart Subils D., Baas A., Branciard C., Gisin N. et Zbinden H., « Testing the speed of "spooky action at a distance" », *Nature*, 2008, 454, p. 861-864.

11. Cocciano B., Faetti S. et Fronzoni L., « A lower bound for the velocity of quantum communications in the preferred frame », *Phys. Lett. A*, 2011, 375, p. 379-384.

12. Bohm D., « A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variable », *Physical Review*, 1952, 85, p. 2.

13. Pour éviter une communication sans transmission, le modèle de Bohm suppose que certaines variables nous sont inaccessibles à jamais.

14. Scarani V. et Gisin N., « Superluminal hidden communication as the underlying mechanism for quantum correlations : Constraining models », *Brazilian Journal of Physics*, 2005, 35, p. 328-332.

15. Suarez A. et Scarani V., « Does entanglement depend on the timing of the impacts at the beam- splitters ? », *Phys. Lett. A*, 1997, 232, p. 9.

16. Cette expérience a été financée par la Fondation Marcel et Monique Odier de Psycho-Physique. Après une licence en physique et un doctorat en mathématiques, Marcel Odier assura la cinquième génération dans la grande banque privée familiale.

17. Stefanov A., Zbinden H., Gisin N. et Suarez A., « Quantum correlation with moving beamsplitters in relativistic configuration », *Pramana (Journal of physics)*, 1999, 53, p. 1-8. Gisin N., Scarani V., Tittel W. et Zbinden H., « Quantum nonlocality : From EPR-Bell tests towards experiments with moving observers », *Annalen der Physik*, 2000, 9, p. 831-842.

18. Quand Suarez a appris notre résultat il est immédiatement venu à Genève et a remarqué que l'étudiant a monté l'expérience à l'envers : les miroirs se rapprochaient au lieu de s'éloigner ! Et aucun d'entre nous ne s'en était rendu compte (pas fiers !). L'expérience a été corrigée et répétée, mais le résultat est resté le même.

19. Laplace P.-S., *Essai philosophique sur les probabilités*, Bachelier, 1814.

20. Pour certains physiciens, le réalisme implique le déterminisme. Or nous avons vu que la non-localité implique le vrai hasard. Il faut donc un concept de réalisme avec du vrai hasard.

21. À ce propos, il est intéressant de noter que la première publication de cryptographie quantique a été refusée par tous les journaux de physique ! Ainsi, elle est parue dans une conférence d'informatique tenue en Inde. Cela peut paraître très surprenant aux profanes, mais tous les physiciens expérimentés savent qu'il est toujours difficile de publier une idée particulièrement originale. Il faut passer le mur de scepticisme des collègues, mur nécessaire pour filtrer les idées incompatibles avec des faits d'ores et déjà bien établis.

22. Gisin N., « Non-realism : Deep thought or a soft option ? », *Foundations of Physics*, 2012, 42, p. 80-85.

23. Franson J. D., « Bell's theorem and delayed determinism », *Physical Review D*, 1985, 31, p. 2529-2532.

24. Penrose R., « On gravity's role in quantum state reduction », *General Relativity and Gravitation*, 1996, 28, p. 581-600. Diosi L., « A universal master equation for the gravitational violation of the quantum mechanics », *Phys. Lett. A*, 1987, 120, p. 377. Adler S., « Comments on proposed gravitational modifications of Schrödinger dynamics and their experimental implications », *J. Phys. A*, 2007, 40, p. 755-763.

25. Salart D., Baas A., Van Houwelingen J. A. W., Gisin N. et Zbinden H., « Spacelike separation in a Bell test assuming gravitationally induced collapses », *Physical Review Letters*, 2008, 100, p. 220404.

26. Les adeptes du multivers affirment que leur théorie est locale, mais le sens dans lequel elle serait locale n'est pas clair. Quand Alice pousse sa manette, elle, sa boîte et tout son environnement se divisent en deux branches en superposition, l'une tout aussi réelle que l'autre. De même pour Bob. Quand les environnements d'Alice et de Bob se rencontrent, ils s'imbriquent judicieusement de telle sorte qu'ils favorisent dans chaque branche les règles du jeu de Bell. Cette histoire raconte l'équation de Schrödinger, mais fait-elle vraiment davantage que de mettre des mots peu clairs sur une belle équation ? Est-ce une explication ? Et surtout, est-ce une explication locale ?

27. Pour une théorie incluant des variables quantiques et classiques (par exemple des résultats de mesures), cela peut se formaliser en exigeant que l'évolution des variables quantiques doive pouvoir être conditionnée par les variables classiques (l'expérimentateur doit pouvoir activer ou non un potentiel en fonction de résultats de mesures antérieures). L. Diósi, *Classical-Quantum Coexistence : A « Free Will » test*, arXiv:1202.2472.

28. Gisin N., « L'épidémie du multivers », in Dars J.-F. et Papillaut A. (dir.), *Le Plus Grand des hasards. Surprises quantiques*, Belin, 2010.

Chapitre 10

RECHERCHES ACTUELLES SUR LA NON-LOCALITÉ

1. Ekert A., « Quantum cryptography based on Bell's theorem », *Phys. Rev. Lett.*, 1991, 67, p. 661-663.

2. Weinberg S., *Le Rêve d'une théorie ultime*, Odile Jacob, 1997.

3. Rothen F., *Le Monde quantique, si proche et si étrange*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2012. Gilder L., *The Age of Entanglement*, *op. cit.*

4. Méthot A. et Scarani V., « An anomaly of non-locality », *Quantum Information and Computation*, 2007, 7, p. 157-170.

5. Popescu S. et Rohrlich D., « Nonlocality as an axiom », art. cit.

6. <http://www.qutools.com>.

7. Cerf N. J., Gisin N., Massar S. et Popescu S., « Simulating maximal quantum entanglement without communication », *Physical Review Letters*, 2005, 94, p. 220403.

8. Brassard G., « Quantum Communication Complexity », *Foundations of Physics*, 2003, 33, p. 1593-1616.

9. Brassard G., Buhrman H. *et al.*, « Limit on nonlocality in any world in which communication complexity is not trivial », *Physical Review Letters*, 2006, 96, p. 250401.

10. Svetlichny G., « Distinguishing three-body from two-body nonseparability by a Bell-type inequality », *Phys. Rev. D*, 1987, 35, p. 3066. Collins D., Gisin N., Popescu S., Roberts D. et Scarani V., « Bell-type inequalities to detect true n-body nonseparability », *Physical Review Letters*, 2002, 88, p. 170405.

11. Branciard C., Gisin N. et Pironio S., « Characterizing the nonlocal correlations created *via* entanglement swapping », *Physical Review Letters*, 2010, 104, p. 170401. Branciard C., Rosset D., Gisin N. et Pironio S., « Bilocal versus non-bilocal correlations in entanglement swapping experiments », *Physical Review A*, 2012, 85, 032119.

12. Scarani V., Gisin N., Brunner N., Masanes L., Pino S. et Acín A., « Secrecy extraction from no-signaling correlations », *Physical Review A*, 2006, 74, 042339.

13. Device Independent Quantum Information Processing, <http://www.chistera.eu/projects/dqip>.

14. Gisin N., « Impossibility of covariant deterministic nonlocal hidden-variable extensions of quantum theory », *Physical Review A*, 2011, 83, 020102.

15. Conway J. H. et Kochen S., « The free will theorem », *Found. Phys.*, 2006, 36, p. 1441-1473.

16. Plus précisément, une variable n'est pas en soi locale ou non locale. Dans le cas présent, c'est l'usage qu'en fait la fonction S_{AB} qui fait dire aux physiciens que la variable k est non locale.

17. Colbeck R. et Renner R., « No extension of quantum theory can have improved predictive power », *Nature Communications*, 2011, 2, p. 411. Pusey M. F., Barrett J. et Rudolph T., « The quantum state cannot be interpreted statistically », *Nature Physics*, 2012, 8, p. 476-479.

18. Bancal J. D., Pironio S., Acín A., Liang Y. C., Sacarni V. et Gisin N., « Quantum nonlocality based on finite-speed causal influences leads to superluminal signalling », arXiv:1011.3795.

CONCLUSION

1. Les choses ont bien changé ces vingt dernières années. L'émergence de l'information quantique et la conversion de l'énorme communauté de la physique du solide ont fait exploser l'usage de mots encore pratiquement interdits il y a deux décennies, tels que « non-localité », « corrélations non locales », « vrai hasard », « inégalité de Bell ». Mais il reste une grande communauté encore et toujours réfractaire : celle de la physique des hautes énergies. Il semble que ces physiciens considèrent jalousement que seule leur physique aborde des questions fondamentales, que le reste de la physique n'est qu'ingénierie élaborée. Le xx^e siècle a vu le nombre de physiciens professionnels augmenter drastiquement, et la sociologie de cette communauté reste à écrire.

2. Needham J., *La Tradition scientifique chinoise*, Hermann, 1974.

REMERCIEMENTS

En terminant ce livre je pense tous mes étudiants et autres collaborateurs qui m'ont tant stimulé. Je remercie aussi tous ceux qui ont relu et critiqué les premières versions, en particulier mon éditeur Nicolas Witkowski. Ce livre doit beaucoup à sa patience et à ses compétences. Ma reconnaissance va également au Fonds national suisse de la recherche scientifique et à l'Europe pour avoir généreusement financé mon laboratoire, ainsi qu'à l'Université de Genève où il fait bon travailler. Finalement, je remercie la providence qui m'a permis de vivre à une époque formidable pour la physique et d'avoir pu – modestement – y contribuer.

TABLE DES ENCADRÉS

1. NEWTON	20
2. AU HASARD	36
3. INÉGALITÉ DE BELL	40
4. JOHN BELL	44
5. UNE COMMUNICATION SANS TRANSMISSION EST IMPOSSIBLE	45
6. UN CALCUL NON LOCAL	53
7. LE DÉTERMINISME IMPLIQUERAIT UNE COMMUNICATION SANS TRANSMISSION	56
8. RELATIONS D'INCERTITUDE D'HEISENBERG	64
9. LE THÉORÈME DE « NON-CLONAGE »	66
10. ÉCHAPPATOIRE DE DÉTECTION	115
11. L'EXPÉRIENCE SATIGNY-JUSSY : 50 000 FOIS LA VITESSE DE LA LUMIÈRE	123

TABLE DES FIGURES

1. LE JEU DE BELL	31
2. L'INTÉRIEUR DES BOÎTES.....	47
3. DIRECTIONS DE MESURE DE BIT QUANTIQUE.....	77
4. OMBRES DE L'ESPACE DE CONFIGURATION.....	81
5. EXPÉRIENCE DE BELL HORS LABORATOIRE.....	83
6. BIT QUANTIQUE CODÉ EN TEMPS (<i>TIME-BIN</i>)	88
7. GÉNÉRATEUR DE NOMBRES ALÉATOIRES QUANTIQUES.....	93
8. LA TÉLÉPORTATION QUANTIQUE	104
9. LA TÉLÉPORTATION D'INTRICATION.....	107
10. LABORATOIRE D'ALAIN ASPECT EN 1982 ET NOTRE SOURCE DE 1997.....	119
11. DU PRINCIPE DE CONTINUITÉ À LA NON-LOCALITÉ	143

TABLE

PRÉFACE	7
AVANT-PROPOS	13
INTRODUCTION	15
<i>À quoi ça sert ? (17)</i>	
CHAPITRE 1 – APÉRITIFS	19
<i>Newton : une si grande absurdité... (19) – Un drôle de « téléphone non local » (21)</i>	
CHAPITRE 2 – CORRÉLATIONS LOCALES ET NON LOCALES	25
<i>Corrélations (26) – Le jeu de Bell (30) – Calcul non local : $a + b = x \cdot y$ (33) – Stratégies locales pour le jeu de Bell (35) – Gagner au jeu de Bell : corrélations non locales (42) – Gagner au jeu de Bell ne permet pas de communiquer (45) – Ouvrons les boîtes (47)</i>	
CHAPITRE 3 – NON-LOCALITÉ ET VRAI HASARD	51
<i>Un tout non local (52) – Télépathie et vrais jumeaux (53) – Coordonner n'est pas communiquer (55) – Un hasard non local (57) – Un « vrai » hasard (59) – Le vrai hasard permet la non-localité sans communication (61)</i>	
CHAPITRE 4 – LE CLONAGE QUANTIQUE EST IMPOSSIBLE	63
<i>Le clonage quantique permettrait une communication impossible (65) – Cloner l'ADN ? (67) – Interlude : clonage approximatif (67)</i>	

CHAPITRE 5 – L'INTRICATION QUANTIQUE	71
<i>Holisme quantique (71) – Indéterminisme quantique (72)</i>	
<i>– Intrication quantique (73) – Comment est-ce possible ? !</i>	
<i>(74) – Comment l'intrication permet de gagner au jeu de</i>	
<i>Bell (76) – La non-localité quantique (79) – Origine des cor-</i>	
<i>rélations quantiques (80)</i>	
CHAPITRE 6 – EXPÉRIENCE	83
<i>Produire des paires de photons (84) – Produire de l'intri-</i>	
<i>cation (85) – Intrication de bit quantique (87) – L'expé-</i>	
<i>rience Bernex-Bellevue (89)</i>	
CHAPITRE 7 – APPLICATIONS	91
<i>Génération de nombres aléatoires au vrai hasard (92) – La</i>	
<i>cryptographie quantique QKD : le principe (94) – La cryp-</i>	
<i>tographie quantique QKD : la pratique (96)</i>	
CHAPITRE 8 – LA TÉLÉPORTATION QUANTIQUE	99
<i>Substance et forme (100) – Mesure jointe (102) – Protocole</i>	
<i>de téléportation quantique (105) – Fax quantique et réseaux</i>	
<i>de communication quantique (108) – Peut-on téléporter de</i>	
<i>grands objets ? (109)</i>	
CHAPITRE 9 – LA NATURE EST-ELLE RÉELLEMENT	
NON LOCALE ?	111
<i>La non-localité chez Newton (112) – Échappatoire de détec-</i>	
<i>tion (113) – Échappatoire de localité (116) – Une combi-</i>	
<i>naison d'échappatoires ? (120) – Une communication</i>	
<i>supraluminique cachée ? (121) – Alice et Bob mesurent cha-</i>	
<i>cun avant l'autre (125) – Hyperdéterminisme et libre arbitre</i>	
<i>(127) – Réalisme (129) – Multivers (131)</i>	
CHAPITRE 10 – RECHERCHES ACTUELLES	
SUR LA NON-LOCALITÉ	133
<i>Peut-on « peser » la non-localité ? (134) – Pourquoi ne pas</i>	
<i>gagner au jeu de Bell à tous les coups ? (135) – Non-localité</i>	
<i>à plus de deux parties (137) – Le « théorème du libre</i>	
<i>arbitre » (138) – Une influence cachée ? (140)</i>	
CONCLUSION	145
NOTES	151
REMERCIEMENTS	163
TABLE DES ENCADRÉES	165
TABLES DES FIGURES	167

Cet ouvrage a été transcodé et mis en pages
chez NORD COMPO (Villeneuve-d'Ascq)

L'IMPENSABLE HASARD

NON-LOCALITÉ, TÉLÉPORTATION ET AUTRES MERVEILLES QUANTIQUES

Explication du monde à très petite échelle, monde peuplé d'atomes et de photons, la physique quantique n'est pas avare de propriétés singulières. À notre échelle, la supraconductivité, les lasers et l'effet tunnel résultent de phénomènes quantiques. Mais cette science a aussi des implications plus fondamentales, qui constituent de véritables défis à la logique ordinaire. La notion d'« intrication », en particulier, explorée depuis une trentaine d'années, mène à l'existence, très contre-intuitive, d'un hasard ubiquitaire, capable de se manifester simultanément en plusieurs endroits de notre univers...

Cette stupéfiante « non-localité » n'est pas une abstraction gratuite ou un jeu de l'esprit ; elle a des applications bien concrètes en cryptographie, pour la protection des données financières et médicales, et a permis la démonstration d'une « téléportation quantique » dont les auteurs de science-fiction les plus imaginatifs ont du mal à entrevoir les infinies possibilités.

À l'opposé de la littérature ordinaire sur le sujet, ce petit livre ne tente pas de contourner les réelles difficultés logiques imposées par la physique quantique. De « jeu de Bell » en expériences d'intrication quantique, il mène vers une solide compréhension d'un des domaines les plus fascinants de la physique actuelle.

NICOLAS GISIN

Physicien théoricien, directeur du département de physique appliquée de l'Université de Genève, Nicolas Gisin est un pionnier de la téléportation et de l'informatique quantiques. Il est cofondateur de la société ID Quantique, leader mondial en cryptographie quantique. Il a reçu en 2009 le premier prix John Stewart Bell.

préface de **Alain Aspect**