

Quantix

Notes et références

[p. 11] « Notre vision du monde... » — Bruce Rosenblum et Fred Kuttner, *Quantum Enigma, Physics Encounters Consciousness*, Oxford University Press, Oxford, 2011, p. 6 : « La physique classique (...) est habituellement une excellente approximation pour les objets plus grands que les molécules (...) C'est toutefois seulement une approximation (...) nous savons maintenant que cette vue classique est fondamentalement incorrecte ».

[p. 14] « Soudain le temps... » — Dan Falk, *In Search of Time, Journeys Along a Curious Dimension*, McClelland & Stewart Ltd, 2008, p. 1.

[p. 15] « Si l'homme assis... » — Dans cette BD, nous évoquons un vélo, le physicien théoricien Brian Greene prend, lui, l'exemple d'une voiture. (Brian Greene, *La Magie du cosmos*, Paris, Robert Laffont, 2005, p. 69).

[p. 23] « Temps et espace se compensent... » — Brian Greene, *ibid.*, p. 70.

[p. 23] « Lorsque cet observateur extérieur... » — À mesure que la vitesse augmente, il faut toujours plus d'énergie pour déplacer l'objet, or l'énergie équivaut à la masse, nous le verrons plus loin. Il faut différencier cette « masse inerte » de la « masse invariante », qui représente la quantité de matière dans un corps, soit une valeur absolue quel que soit le référentiel et la vitesse (voir également note p. 39).

(Réf. princ. : Dictionnaire de Physique, R. Taillet-L. Villain- P. Febvre ; Éd. De Boeck, p. 419-420 / art. « Does Mass Change with Velocity ? », Don Koks et Jim Gibbs, <http://www.phys.ncku.edu.tw>).

[p. 24] « La tour de contrôle... » — Exemples tirés de Christophe Galfard, *L'Univers à portée de main*, Flammarion, Paris, 2015, p. 208-210. Également Dan Falk, op. cit., p. 161.

[p. 25] « Même à vélo, le temps décélère... » — À nouveau : le cycliste ne verrait, lui, aucune variation temporelle, en admettant qu'il puisse mesurer cette donnée avec une montre ultra-précise. Cette dilatation temporelle serait en revanche mesurable depuis un objet stationnaire « connecté » à la montre du cycliste. « La *dilatation du temps*, telle qu'on appelle le ralentissement relativiste des horloges en regard des objets en mouvement, est tout à fait réelle et expérimentée chaque jour sur Terre », écrit le physicien théorique Lawrence M. Krauss. Une dilatation d'une nanoseconde correspond à un milliardième de seconde, soit 10^{-9} seconde. Notez enfin que les variations de couleurs sur notre sphère spatio-temporelle bleue et jaune sont volontairement exagérées, ce pour les besoins de la démonstration.

(Réf princ. : Lawrence M. Krauss, *The Greatest Story Ever Told... So far*, ed. Simon & Schuster, London, p. 60 / Brian Greene, op. cit p. 71.)

[p. 26] « Nous vivons une réalité temporelle... » — Le calcul de la dilatation du temps se base sur le facteur dit de Lorentz, du nom du mathématicien néerlandais H.-A. Lorentz. C'est un paramètre clé de nombreuses formules de la relativité restreinte d'Albert Einstein. Le facteur de Lorentz, noté γ (lettre gamma) dit ceci :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Calculons par exemple la dilatation temporelle si l'on embarque dans un avion de ligne (le v de l'équation) volant à 800 km/h, soit 0,22 km/s ? Sachant que la vitesse de la lumière (notée c et arrondie à 300 000 km/s) est constante, nous obtenons :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{0,22^2}{300'000^2}}} = 1'000'000'000'00026$$

Autrement dit : pour 1 seconde passée pour un observateur sur Terre, l'avion perd 0,000 000 000 000 26 seconde ou 0,000 26 nanoseconde (Nous faisons ici abstraction d'autres facteurs comme l'attraction terrestre par ex.) C'est le type de différence temporelle qu'ont mesuré Hafele et Keating dans leur expérience avec un Boeing de la Pan Am en 1971 (voir BD p. 26).

Mais imaginons maintenant un objet volant à la vitesse de lumière, autrement dit où $v = c$. Nous obtenons ceci :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{300'000^2}{300'000^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1-1}} = \frac{1}{\sqrt{0}}$$

Et là, gros problème ! En effet lorsque $v = c$, il y a division par zéro de la transformation de Lorentz. Or une division par zéro est une aberration mathématique : elle tend vers l'infini. Si un objet atteint une vitesse (v) proche de celle de la lumière (c), sa masse inerte grandit indéfiniment, et donc l'énergie nécessaire à le bouger tend à être infinie. Voici pourquoi rien ne va plus vite que la lumière, explique le physicien Brian Greene (art. « That Famous Equation and You », *New York Times*, 30 sept 2005). À noter que la vitesse exacte de la lumière est de 299 792 km/s.

[p. 26] « C'est en 1971 que deux scientifiques... » — Ce test d'octobre 1971 est connu sous le nom d'expérience « Hafele-Keating », du nom de ses deux initiateurs. D'autres expériences du même type confirmeront les résultats les années suivantes.

[p. 26] « Les horloges de l'avion... » — Si les lois de la relativité restreinte sont incontestées, leur interprétation, voire même leur description, reste débattue. Illustration avec le célèbre paradoxe des jumeaux que le physicien français Paul Langevin soumit à Einstein en 1911 : l'histoire met en scène des frères jumeaux. L'un reste sur Terre, l'autre embarque dans une fusée effectuant un voyage aller-retour dans l'espace à une vitesse proche de celle de la Lumière. Disons que 30 ans s'écoulent sur Terre. Le jumeau voyageur est de retour : selon la relativité restreinte, le temps s'est écoulé plus lentement pour lui que pour son frère resté sur Terre, admettons 3 ans au lieu de 30 ans, en raison de la fantastique vitesse de sa fusée.

Une première remarque formelle apparaît : les équations de la relativité restreintes disent que pour chacun des jumeaux, le temps s'est écoulé de manière identique dans son référentiel inertiel respectif (où le temps est uniforme, l'espace homogène et la vitesse nulle ou en mouvement rectiligne uniforme). L'horloge du jumeau voyageur a « tictaqué » à la même vitesse que celle de son jumeau terrien. Certains scientifiques considèrent donc qu'il est faux de dire que le temps ralentit quand on se déplace.

Néanmoins, vue de la Terre, l'horloge du jumeau voyageur a bel et bien ralenti relativement à celle restée sur Terre. Trente ans se sont écoulés pour le jumeau sédentaire contre trois ans pour le jumeau voyageur. Le jumeau voyageur revient donc plus jeune que son frère, selon le principe d'Einstein. Notons que depuis Einstein, il y a eu plus de cinquante interprétations du paradoxe des jumeaux ! Certains théoriciens différencient par exemple temps propre et temps biologique, estimant que le jumeau voyageur n'est biologiquement pas plus jeune que son frère. Mais ce n'est pas le consensus scientifique.

Notons enfin qu'à l'origine, le paradoxe des jumeaux de Langevin soulignait un paradoxe de symétrie. En effet, avec une inversion de point de vue, nous pouvons considérer que c'est la Terre qui s'éloigne à grande vitesse et non la fusée. Dès lors, les jumeaux peuvent tous deux estimer qu'ils s'éloignent l'un de l'autre à grande vitesse et donc « rajeunissent » l'un par rapport à l'autre. Il y a bien un principe de symétrie dans l'effet prédit par la relativité. Mais ce paradoxe n'est ici qu'apparent : c'est le jumeau en fusée qui rajeunit. Il ne peut pas avoir été constamment animé

d'un mouvement rectiligne et uniforme. Il a dû accélérer et décélérer. De plus, pour revenir à son point de départ il a fait demi-tour quelque part. Il a changé de référentiel inertiel. Simplement dit : c'est lui qui s'est déplacé. Le jumeau terrien est resté lui dans un seul référentiel. Les résultats du test Hafele-Keating dont nous parlons p. 26, le démontrent d'ailleurs concrètement : c'est l'horloge atomique placée dans l'avion qui ralentit, pas celle au sol.

(Réf. princ. : Lawrence M. Krauss, *op.cit* p. 59-61/ Minutes Physics « Complete Solution to Twin Paradox », Youtube / Wikipedia : « Le Paradoxe des jumeaux ».)

[p. 27] « **Les champions de vitesse...** » — Les sondes les plus rapides ont atteint des vitesses proches de 30 km/s (soit environ 108 000 km/h) grâce à l'assistance gravitationnelle : elles utilisent la gravité de grosses planètes pour augmenter leur vitesse, un peu comme une fronde. Cette vitesse faramineuse à notre échelle, ne représente que le 0.01 % de la vitesse de la lumière.

[p. 27] « **Tout circule dans l'espace...** » — Le temps ne s'écoule pas pour le photon, car il est dénué de masse. « Si bien que l'atemporalité n'est à portée de rien, ni personne, à l'exception du petit nombre des particules non massives. » (Brian Greene, *La Magie du Cosmos, op. cit.*, p. 593.)

[p. 28] « **Par ailleurs, il semble que l'écoulement du temps lui-même soit une illusion.** » — La relativité restreinte affirme que le temps englobe aussi bien le passé que le présent ou le futur. Chaque instant dans l'univers serait ainsi sur un pied d'égalité : « Si l'on suit la relativité, nous avons juste un espace-temps quadridimensionnel statique, avec aucun écoulement le concernant. Le temps ne s'écoule pas plus que l'espace », écrit Roger Penrose, mathématicien britannique.

Le temps ne s'écoule donc pas. Fichtre. Mais alors que fait-il ? Étonnamment, l'unique loi physique qui distingue le passé du futur est le passage du chaud au froid - jamais l'inverse -, le principe d'*entropie*, l'augmentation naturelle du désordre. Ce principe serait responsable de toutes les différences entre passé et futur que nous connaissons : du glaçon qui fond dans un verre au vieillissement. Einstein voyait lui, le temps comme une « illusion obstinément persistante ». En physique quantique, le temps semble d'ailleurs tout simplement absent des expériences, comme hors de notre champ de mesure. Le temps forme-t-il un « univers bloc », dont l'histoire serait déjà définie ? Certains l'affirment. La théorie de la gravité quantique à boucles conçoit plutôt le temps comme intégré à un champ quantique. Au niveau fondamental, la variable temps appartiendrait à un champ dynamique diffus : « Celui-ci saute, fluctue, se concrétise seulement dans l'interaction et n'est pas défini en deçà d'une échelle minimale. » écrit le physicien Carlo Rovelli dans son livre *L'Ordre du temps*.

L'auteur américain Dan Falk a voulu y voir plus clair, multipliant les interviews auprès de spécialistes dans son ouvrage *In Search of Time*. Sa conclusion ? « Après avoir parlé à tellement de scientifiques, il semble que le seul consensus à propos du temps est... qu'il n'est pas ce que nous pensons qu'il est. », écrit-il, un brin désabusé.

(Réf. princ. : Dan Falk, *In Search of Time*, ed NMM, Londres, 2009 p. 243/ Carlo Rovelli, *Et si le temps n'existait pas*, éd. Dunod, 2012, p. 14/ Roger Penrose, *Shadows of the Mind*, Oxford University Press, 1994, p. 384).

[p. 29] « **Du reste, il circule nombre de citations du génial physicien...** » — Parmi les citations farfelues faussement attribuées à Einstein, retenons : « Remplir une feuille d'impôt est plus compliqué que la théorie de la relativité ». Ou la très étonnante « L'astrologie est une science en soi illuminatrice. J'ai appris beaucoup grâce à elle, et je lui dois beaucoup (...) », tombée du ciel dans un livre d'astrologie allemand à la fin des années 50. Propos apocryphe s'il en est, car Einstein détestait l'astrologie qu'il considérait comme une fumisterie.

Le fait qu'en 2001 l'astrologue Elisabeth Teissier ait mis en exergue cette prétendue citation d'Einstein dans sa thèse en sociologie à la Sorbonne est déjà inquiétant en soi. Le plus navrant fut qu'aucun des experts ne sourcilla, déplore Jean-Paul Krivine, rédacteur en chef de la revue Science et pseudosciences. Elisabeth Teissier reçut même le titre de « Docteur en sociologie » avec mention « très honorable ». Ce diplôme déclencha un tsunami polémique dont la Sorbonne ne sortit pas grandie. À noter qu'Alice Calaprice - spécialiste mondiale d'Einstein - a publié un ouvrage de référence relatif aux vraies - et fausses - citations du célèbre physicien : *The Ultimate Quotable Einstein*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 2013 (non disponible en français). Voir également l'article de Denis Hamel, « Albert Einstein, astrologue ? Vous voulez rire ? La fin d'un canular », in *Le Québec sceptique* – Numéro 57, page 31, été 2005.

[p. 31] — Douglas Adams, *Le restaurant au bout de l'Univers*, préface, tome II de la trilogie *Le guide du voyageur galactique*, 1982 (titre original : *The Hitchhikers Guide to the Galaxy*).

[p. 32] « ... les gens les plus intéressés aux êtres vivants sont aussi les plus enclins à provoquer leur extinction. » — Aux XIX^e et début du XX^e, des espèces même très communes furent décimées. Citons le pigeon migrateur ou la magnifique perruche de Caroline du Sud. Outre Alanson Bryan, de nombreux autres naturalistes, zoologues et « amoureux » de la nature contribuèrent à l'extinction d'espèces. Le « banquier-naturaliste » (ça ne s'invente pas) Lionel Walter Rothschild, collectionneur compulsif de trophées, fut l'un de leurs pires représentants. L'auteur Bill Bryson y consacre un chapitre entier dans *A Short History of Nearly Everything* (éd. française : *Une histoire de tout, ou presque*), New York, Broadway Books, 2004, p. 470 et suiv. / Voir aussi Allan Weisman, *Homo Disparitus* (éd. orig. : *The World Without Us*), Paris, Flammarion, 2007, chapitre V, « La ménagerie perdue ».

[p. 33] « L'homme de Java attendra... » et « le premier crâne d'australopithèque servit durant des années... » — Le crâne australopithèque découvert par Raymond Dart ne fut reconnu qu'en 1947. Quant à Eugène Dubois, il passa la fin de sa vie aigri et incompris. Pour ses contemporains, le crâne restait celui d'un singe, pas celui d'un de nos ancêtres. L'homme de Java fut pourtant reclassifié *homo erectus* en 1950, soit 10 ans après la mort de Dubois. Bill Bryson, qui nous narre les mésaventures de Dubois et Dart, ne résiste pas au plaisir d'aussi évoquer le cas étrange d'un autre squelette trouvé à Périgueux qui fut estampillé d'origine esquimaude. L'auteur précise avec malice : « Ce qu'un ancien Eskimo faisait dans le sud-ouest de la France, ne fut jamais confortablement expliqué » (p. 436). Bill Bryson, *ibid.* p. 434-438.

[p. 34] « Il n'y a plus rien de nouveau... » — Dans cette citation de 1900, William Thomson alias Lord Kelvin parle plus spécifiquement des sciences de la physique, pour lesquelles il a contribué par ses travaux en thermodynamique.

[p. 34] « ...ce collaborateur qu'il apprécie pour son esprit vif. » — Une croyance tenace veut qu'Einstein ait été mauvais élève. Cette idée a une vertu : donner quelques espoirs rédempteurs aux parents d'enfants en difficulté scolaire. Hélas, mauvaise nouvelle pour les cancre : Einstein était en fait très bon élève. S'il s'est ennuyé à l'école, c'est surtout parce qu'il était doué. Enfant, il reçut un livre d'algèbre dont il résolut tous les problèmes et inventa même sa propre démonstration du théorème de Pythagore. Plus tard, bien que doté de capacités en maths largement supérieures à la moyenne de la population, Einstein était déconsidéré par les mathématiciens professionnels (N.B. : ce qui, avouons-le, est franchement vexant pour la « moyenne »). L'un de ses contemporains, le grand mathématicien David Hilbert, écrivit : « N'importe quel gars dans les rues de Göttingen comprend mieux qu'Einstein la géométrie à quatre dimensions. Malgré cela, c'est Einstein qui a fait le travail [de la relativité générale], pas les mathématiciens ». Une belle façon de rendre hommage au génie intuitif d'Einstein.

(Réf. princ. : Carlo Rovelli, *Par-delà le visible, la réalité du monde physique et la gravité quantique*, éd. Odile Jacob Sciences, Paris, 2015, p. 85 / Dan Falk, *Universes on a T-shirt, the Quest for the Theory of Everything*, Arcades Publishing, 2002, p. 93).

[p. 35] « En frappant ce métal, ces quanta de photons créent un courant électrique. » — C'est l'effet photoélectrique, principe des panneaux solaires photovoltaïques.

[p. 36] « Avec sa théorie des quanta de lumière, Einstein... » — Einstein reçoit le Prix Nobel en 1921 pour sa théorie photoélectrique. Mais personne ne croit alors vraiment à l'existence des « quanta de lumière ». Celle-ci ne fut constatée qu'en 1923 grâce à Arthur Compton, soit presque 20 ans après qu'Einstein ait évoqué leur existence. Voir également la BD p. 86.

[p. 37] — Christophe Galfard, *E = mc², l'équation de tous les possibles*, Flammarion, Paris, 2017, p. 10

[p. 38] « ... fournir l'électricité à la ville de Paris et sa banlieue... » — Le calcul présenté est basé sur le principe d'une consommation moyenne de 2 GWh par an pour 1 000 habitants. Une agglomération comme celle de Paris et ses quelque 12 millions d'habitants consomme donc annuellement quelque 24 000 GWh.

[p. 39] $E = mc^2$ — Un objet de masse m et bougeant à une vitesse v possède une énergie cinétique de $E = \frac{1}{2} mv^2$, selon le calcul classique de l'énergie de mouvement. Le calcul de l'énergie cinétique est connu depuis le XVII^e siècle. La vitesse (v) est mise au carré, car il faut beaucoup plus d'énergie à une masse (m) pour voyager à - par exemple - deux fois sa vitesse initiale. Ainsi, imaginons un objet de 10 kg lancé d'abord à une vitesse de 50 mètres/s, puis une seconde fois à 100 m/s (soit 2 x la vitesse) : le premier lancer nécessitera une puissance de 12 500 joules, mais la seconde exigera 50 000 joules (soit 4 x plus). La vitesse a doublé, mais l'énergie nécessaire a, elle, quadruplé.

$E = mc^2$ donne une autre facette de l'énergie liée à ce même objet : l'énergie présente dans sa masse. Nous pouvons illustrer l'équivalence entre masse et énergie en termes de transmutation atomique. Si dans une réaction nucléaire (fission ou fusion) une masse m disparaît, alors l'énergie mc^2 est libérée. Réciproquement si une énergie E est absorbée par la réaction, la masse augmente de E/c^2 .

$E = mc^2$ ou $m = E/c^2$ sont en réalité des formules simplifiées s'appliquant à des objets au repos ou à une vitesse très inférieure à celle de la lumière c . Pour des objets dotés d'une vitesse proche de c , l'équation devient directement liée à la relativité restreinte. Celle-ci stipule, nous l'avons vu, que temps et espace sont les deux faces d'une même pièce et qu'ils varient selon les observateurs (leur vitesse notamment). Relier temps et espace revient à utiliser un espace à quatre dimensions (trois spatiales et une temporelle) que formalisa le mathématicien H. Minkowski. Dans cet espace quadridimensionnel, nous utilisons la transformation dite de Lorentz, déjà vue en note p. 26. Pour rappel :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Celle-ci permet de préserver l'intervalle spatio-temporel entre deux événements, quels que soient les points de vue des observateurs. Donc pour des objets dotés d'une vitesse proche de c , l'équation complète d'Einstein devient :

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Ou plus simplement écrit : $E = \gamma mc^2$

Les lois de l'énergie cinétique classique et relativiste sont liées. Dans leur excellent livre *Pourquoi E = mc² ?*, les physiciens Brian Cox et Jeff Forshaw écrivent ainsi : « γmc^2 est approximativement égal à $mc^2 + \frac{1}{2} mv^2$ (...) Nous avons découvert qu'il y a une chose conservée qui est égale à quelque chose (mc^2) plus l'énergie cinétique. Cela fait sens de parler d'une « chose qui est conservée » en tant qu'énergie, mais maintenant elle a deux parties. L'une est $\frac{1}{2}mv^2$ et l'autre est mc^2 . »

Ce facteur de Lorentz permet aussi de distinguer la masse liée au mouvement (m_r) de la masse au repos (m_0). La masse de l'équation d'Einstein ($m = E/c^2$) se mue alors en masse relativiste : m_r (donc E/c^2) = $m_0 / \sqrt{1-v^2/c^2}$. Que nous dit cette équation ? Que la masse m_r s'accroît en fonction de la vitesse d'un objet. Cette notion d'augmentation de la masse relativiste fut beaucoup utilisée, y compris par des gens comme Richard Feynman ou Stephen Hawking. Elle a aussi été source de confusion, laissant penser qu'un objet en mouvement gagne en quantité de matière - en masse invariante - ce qui est un non-sens, puisque cette masse est justement invariante. Si c'était le cas, un objet allant de plus en plus vite pourrait gagner en masse - en quantité de matière - et donc en force gravitationnelle jusqu'à se transformer en trou noir. Or ce n'est pas le cas.

En revanche, ce même objet gagnera bien en masse inerte : avec la vitesse, son inertie sera toujours plus grande, et il faudra donc toujours plus d'énergie pour l'accélérer, autrement dit, augmenter sa vitesse. Or, rappelez-vous, énergie = masse. En tendant vers la vitesse de la lumière, la masse inertielle tend vers l'infini, et donc également l'énergie nécessaire à bouger ladite masse. En fait, la masse relativiste a simplement un autre nom : énergie.

(Réf. princ. : Brian Cox et Jeff Forshaw, *Why does E = mc²*, Da Capo Press, 2009, pp. 130-133 (éd. française : *Pourquoi E = mc². Et comment ça marche ?*, Dunod, 2019)/R Taillet, L. Villain et P. Febvre. *op. cit.* pp. 418-420/site emc2-explained.info/art. Don Koks-Jim Carr-Philips Gibbs, *op. cit.*/art. Wikipédia « Masse ».)

[p. 40] « D'ailleurs nous utilisons $E = mc^2$ tous les jours... » — Réf : Brian Greene, « That Famous Equation and You », *op. cit.* À noter que la combustion d'atomes de carbone (C) est permise grâce à l'oxygène de l'air (O₂) : le résultat - le feu - donne d'une part de l'énergie sous forme de chaleur prise à la masse des atomes de carbone et du CO₂ (gaz carbonique).

La combustion est une réaction chimique : les atomes se séparent et se recombinent simplement pour former de nouvelles molécules, mais leur noyau ne subit aucun changement. Lorsque le noyau de l'atome est changé, nous parlons, logiquement, d'une réaction nucléaire.

[p. 41] « Pourtant en 1895 déjà... » — La radioactivité vient généralement du déséquilibre entre nombre de protons et neutrons dans un noyau (sauf pour le deutérium). L'atome instable va donc émettre des rayons d'énergie - la radioactivité - jusqu'à ce qu'il retrouve une stabilité. Une demi-vie est le temps qu'il faut pour que la moitié des atomes d'une matière ait retrouvé un équilibre. La radioactivité est partout. Dès la formation de la Terre, il y a environ 5 milliards d'années, la matière était constituée d'éléments radioactifs (instables) et d'éléments stables. Depuis la radioactivité n'a cessé de décroître puisque de nombreux atomes radioactifs se sont transformés pour l'essentiel en éléments stables. Il ne reste qu'une vingtaine de radionucléides primordiaux. Les principaux sont le potassium - présent notamment dans les bananes - et ceux issus des trois familles radioactives de l'uranium 238, de l'uranium 235 et du thorium 232. Ces éléments radioactifs sont présents dans l'air, le sol, l'eau et les organismes vivants, dont l'homme.

C'est en 1896 que le physicien français Henri Becquerel découvre le phénomène par hasard alors qu'il a stocké des sels d'uranium phosphorescents dans un tiroir où est déjà rangée une plaque photographique vierge. Au bout de quelques jours, cette plaque porte la trace d'un rayonnement alors que les sels sont restés à l'abri de la lumière. Le physicien s'aperçoit que ce rayonnement est émis par les sels d'uranium eux-mêmes.

Réf : Institut Français de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (mesure-radioactivite.fr) et Institut français de Physique Nucléaire et de Physiques des Particules (partenaire de laradioactivite.com)

[p. 41] « Un neutron lancé contre... » — Institut français de Physique Nucléaire et de Physiques des Particules, *ibid.* Dans une centrale nucléaire, on n'attend pas que l'uranium émette naturellement de la radioactivité, mais on projette un neutron sur l'atome. Seule une portion de la masse est transformée en énergie : nous n'utilisons qu'1 % de l'énergie qui pourrait être libérée d'un morceau d'uranium.

[p. 42] « Cette fusion dite thermonucléaire... » — Le processus de fusion nucléaire ne peut avoir lieu que dans des conditions de température et de pression particulières. À titre d'exemple, au cœur du Soleil, la pression est égale à 200 milliards de fois la pression atmosphérique terrestre et la température centrale atteint environ 15 millions de degrés. Dans ces conditions, les noyaux légers d'hydrogène (75 % de la composition du Soleil) fusionnent en noyaux d'hélium (24 %) approximativement quatre fois plus lourds, créant ainsi la lumière et la chaleur que nous recevons.

La température à l'intérieur du tokamak ITER sera de 150 millions de degrés, soit dix fois celle qui règne au cœur du Soleil. De toutes les réactions de fusion possibles, c'est la réaction entre le deutérium et le tritium (deux isotopes de l'hydrogène) qui se révèle la plus accessible en l'état actuel de la technologie. Un isotope est une famille d'atomes ayant les mêmes propriétés chimiques (nombre identique de protons et d'électrons) mais différant par leur nombre de neutrons : voir BD p. 65.

Réf : CEA, Commissariat français à l'énergie atomique

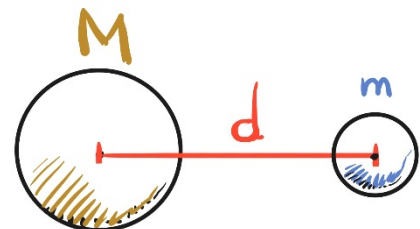
[p. 43] « En attendant, le soleil transforme... » — CEA, *ibid.*

[p. 47] Denis Overbye, *New York Times*, 24 novembre 2015.

[p. 50] « En 1692, Isaac Newton... » — Galilée avait découvert que si on lâche un objet, ce n'est pas la vitesse de chute qui est constante, mais son accélération. Newton découvrit plus tard que c'est la même accélération qui meut les astres en orbite. Il en déduisit la constante gravitationnelle « G » (pour « Gravité ») : $6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg}^2$. Il en tira la loi de l'attraction universelle (« F ») qui mesure l'intensité de la pesanteur et est exprimée en... newton, bien sûr. Cette loi dit ceci : tous les corps de l'Univers s'attirent selon une force proportionnelle à leur masse et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. Soit :

$$F = \frac{GMm}{d^2}$$

Cette équation exprime la force d'attraction F entre deux masses M et m séparées par une distance d, qui sépare les centres de gravité. d s'exprime en mètres, M et m en kilogrammes. La constante G encode la puissance de la force gravitationnelle. Ainsi avec cette formule, 1 kg à la surface de la Terre, vaut 9,81 Newton, qui exprime rappelons-le l'intensité de la pesanteur. Sur la Lune, où la gravité est moindre, ce même kilo vaut 1,62 Newton, soit 6 x moins.



Réf. princ. : Carlo Rovelli, *Par-delà le visible, la réalité du monde physique et la gravité quantique*, *op.cit.*, p 44-46/Brian Cox et Jeff Forshaw, *The Quantum Universe, Everything That Can Happen Does Happen*, Penguin Book, 2102, p. 16-18.

[p. 51] « Newton ne savait pas trop comment... » — On a longtemps pensé que l'éther, sorte de « substance subtile » censée remplir le vide, jouait un rôle dans la gravité. L'humanité se réfère à l'éther depuis l'Antiquité. Le fait qu'on ne connaisse pas sa nature, ni même qu'on ait le moindre indice de son existence a semblé un détail tout à fait négligeable durant des siècles. Durant longtemps, on a aussi pensé que la lumière circulait dans l'éther, comme une vague a besoin d'eau pour se propager, ou comme le son a besoin d'air (dans le cosmos, il n'y a pas de son) Aujourd'hui, les scientifiques ont rangé l'éther au rayon des douces chimères.

Réf. princ. : Christophe Galfard, *op. cit.*, p. 28-29/Brian Green, p. 13, *op. cit.*/Dan Falk, *op. cit.* p. 155.

[p. 52] « Comment diable la gravité pouvait-elle agir... » — Albert Einstein lui-même confia à un collègue à propos de la relativité générale : « De toute ma vie, je n'ai jamais travaillé aussi dur. Je voue désormais un grand respect aux mathématiques (...) Comparé à ce problème, la relativité restreinte était un jeu d'enfant. » (Dan Falk, *ibid.* p. 172).

Einstein fut d'ailleurs aidé par son ami mathématicien Marcel Grossmann pour résoudre les équations de la relativité générale. La citation « il est probable que nous devrions l'attendre encore aujourd'hui » est de Charles Percy Snow (*Variety of Men*, Penguin Books Ltd, 1969).

[p. 52] « suscitant incrédulité et sarcasmes. » — Les théories d'Einstein avaient leurs détracteurs. Parmi eux, Charles Lane Poor, professeur à l'Université de Columbia ironisa que la relativité était une pure « spéculation psychologique » et qu'à son analyse il avait eu l'impression « de s'être promené au Pays des merveilles avec Alice et pris un thé avec le chapelier fou ».

Un autre scientifique nommé George Francis Gillette voyait la relativité sortir du « cerveau d'un enfant débile ». Mal leur en a pris, ironise le physicien Michio Kaku : « La seule raison pour laquelle les historiens se souviennent encore de ces individus tient dans leurs futiles tirades contre la théorie de la relativité. Malheureusement l'adulation grandissante d'Einstein dans la presse stimulait la haine et la jalousie d'une armée grandissante de détracteurs ». Dès les années 20, en Allemagne, la hargne antisémite commença à se mêler à la fronde scientifique. Ce qui poussa Einstein à l'exode.

(Réf. : Michio Kaku, *Einstein's Cosmos : How Albert Einstein's Vision Transformed Our Understanding of Space and Time*, Hachette UK, 2015, p. 118-119.)

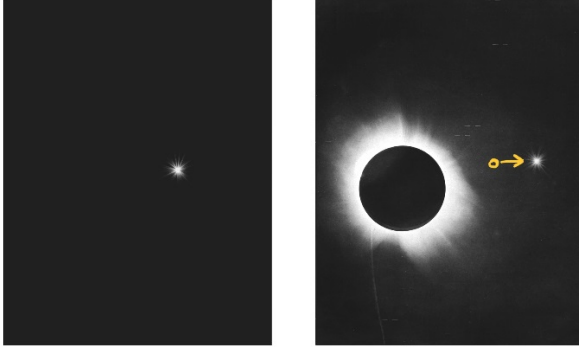
[p. 53] « Ou peut-être... est-ce la gravité qui existe et non l'espace. » — Si gravité et espace forment une seule et même entité, alors il y a deux manières de voir les choses. La plus courante est de considérer que c'est la gravité qui n'existe pas : c'est donc l'espace qui bouge et se déforme. L'autre est de dire qu'au contraire la gravité existe, mais pas l'espace : cette gravité serait plus précisément un vaste champ gravitationnel quantique. Au lieu d'un espace amorphe et passif, nous aurions ainsi un espace dans l'esprit de la relativité générale, doté d'une « nature proche de celle du champ électromagnétique : une entité dynamique en interaction avec les objets qui s'y trouve », écrit Carlo Rovelli (*Et si le temps n'existait pas*, op. cit. p. 14) Cette idée est à la base de la théorie de la gravité quantique à boucles, dont Carlo Rovelli est le fondateur avec Lee Smolin, et sur laquelle travaillent de nombreux chercheurs à travers le monde. Cette théorie entend rassembler physiques relativistes et quantiques contradictoires en plusieurs points. Elle est une alternative à la théorie dite des supercordes.

Concept du « matelas mou » : c'est Dennis Overbye, collaborateur scientifique au Times, qui parle de l'Univers comme du « matelas affaissé suprême » (« The Ultimate Sagging Mattress »). Quant à la référence de la citation « Dans un certain sens... », elle est de Michio Kaku, chapitre « The Theory of the Universe ? » de l'ouvrage collectif *Mysteries of Life and the Universe*, ed. William Shore, 1992, p. 161. À noter que l'Univers comporte bien quatre dimensions : trois spatiales et une temporelle, mais on illustre communément un univers plat à 2 dimensions spatiales pour la commodité de la démonstration (Brian Greene, *Hidden reality*, op. cit. p. 13).

[p. 54] « Durant l'éclipse de 1919... » — L'éclipse solaire du 29 mai 1919 fut l'occasion rêvée de photographier la lumière d'étoiles passant très près du champ gravitationnel du soleil. L'idée était de vérifier l'éventuelle déviation des rayons lumineux. On compara donc les clichés avec des photos de ces mêmes étoiles prises six mois plus tôt, quand la position de la Terre assurait que leur lumière ne passait pas du tout dans le voisinage du soleil. Le résultat fut saisissant : « La courbure de la lumière due à la présence du soleil pliant l'espace-temps dans sa proximité sera révélée par de petits changements dans la position des étoiles entre les deux sets de photographies. La théorie d'Einstein avait prédit le chiffre exact de ce déplacement dû (...) à la déviation de la lumière. » (Kumar Manjit, *Quantum, Einstein, Bohr and The Great Debate about the Nature of Reality*, Norton Ed, 2008, p. 127). À noter que le dessin de la première case de la BD p.54 est inspiré du site de la Nasa (nasa.gov), article « Testing general relativity... Again ! ».

UNE ÉTOILE QUELQUES MOIS
AVANT L'ÉCLIPSE : LOIN
DE L'INFLUENCE DU SOLEIL

DURANT L'ÉCLIPSE: LA MÊME
ÉTOILE SEMBLE DÉCALÉE À
DROITE. LA GRAVITÉ DU SOLEIL
COURBE SA LUMIÈRE.



(Ceci est un montage : le déplacement de l'image de l'étoile est exagéré)

[p. 54] « En fait, tout corps... » — Bill Bryson, *op. cit.* p 12.

[p. 55] « Sans ce calcul de la courbure... » — L'appareillage interne des satellites GPS en orbite au-dessus de la Terre prend en compte la courbure de l'espace-temps : « En fait, si la relativité générale n'était pas prise en compte dans les systèmes de navigation GPS, les erreurs dans la position globale s'accumuleraient à une vitesse d'environ dix kilomètres chaque jour ! » (S. Hawking et L. Mlodinow, *The Grand Design*, ed Transworldbook, 2010, p. 131). Lors de l'installation des satellites GPS, dans les années 70, les physiciens avaient dit aux militaires chargés du projet que les horloges embarquées fonctionneraient aussi plus vite que celles au sol. Mais les généraux eurent de la peine à les croire et testèrent... deux systèmes, l'un corrigé et l'autre non. « Et que croyez-vous qu'il arriva ? », constate avec amusement le physicien Carlo Rovelli. (C. Rovelli, *Et si le temps n'existait pas ?*, *op. cit.* p. 97.)

[p. 55] « Des expériences ont par exemple été réalisées à Boulder... » — Dan Falk, *op. cit.*, p. 174. On pèse aussi moins lourd en montagne qu'au niveau de la mer car si un kilo sur Terre vaut 9.81 Newton (voir note 26), plus on monte, plus la gravité diminue selon l'équation de Newton. Si une montagne de 100 km d'altitude existait, la force d'attraction ne serait plus de 9,81 newtons mais de 9,51. Un homme de 100 kg aurait donc « perdu » 3 kg à son sommet.

[p. 57] « Le soleil est lui-même un nabot... » — Stephen Hawking et L. Mlodinow, *op. cit.*, p. 190.

[p. 58] « Selon la théorie classique, encore débattue, elle créeraient un puits... sans fin ! » — Au centre d'un trou noir, les distorsions de l'espace-temps créées par la gravité sont telles qu'elles deviennent mathématiquement infinies. Or les physiciens et les mathématiciens détestent les infinis. De plus, il faut savoir qu'un trou noir et le big bang, sont les seuls endroits connus où les effets de la relativité du monde macroscopique côtoient les phénomènes quantiques liés au monde microscopique. À ce jour, les deux théories sont incompatibles. Seule une théorie de la gravitation quantique, le Graal des physiciens théoriques, offrirait une porte de sortie. La théorie de la gravité quantique à boucles, notamment, propose une alternative avec un espace-temps granulaire, doté donc de « grains » d'une taille en dessous de laquelle rien ne pourrait aller, stoppant ainsi le phénomène supposé de densité infini du Trou Noir. (Réf princ. : Carlo Rovelli, *Et si le temps*, *op.cit.* pp. 86-88.)

[p. 58] « Imaginons que notre trou noir ressemble à un vortex sur un plan d'eau » — Dessin des bateaux inspiré d'un graphique du site : stronggravity.eu, projet européen « Probing Strong Gravity by Black Holes across the Range of Masses ».

Si tout corps peut courber l'espace-temps, tout corps peut aussi théoriquement se muer en trou noir. Pour cela, il faut prendre en compte le calcul de la « vitesse de libération » développé par le mathématicien Laplace : il s'agit de la vitesse qu'un objet doit atteindre afin de se libérer de l'attraction gravitationnelle de l'astre d'où il est parti. Et étrangement ça marche aussi avec la lumière. Illustration : pour s'arracher à l'attraction terrestre, une fusée doit atteindre au moins 40 000 km/h. En dessous, pas moyen. Or, si la Terre était quatre fois plus petite, mais toujours de même masse, la vitesse de libération multipliée par 2, soit 80 000 km/h. Si elle était encore quatre fois plus petite, des fusées allant à 160 000 km/h seraient cette fois nécessaires pour s'arracher à l'attraction terrestre. Et si la Terre était de plus en plus minuscule, toujours avec une masse inchangée ? « Il existe bien un rayon en dessous duquel la lumière ne peut s'échapper d'un astre. Ce rayon de Schwarzschild, en l'honneur du physicien allemand qui le calcula en 1915, est proportionnel à la masse de l'objet. » écrit l'astrophysicien Roland Lehoucq. « On peut calculer que pour un astre de même masse que la Terre ne laisse pas échapper la lumière son rayon doit être égal à environ un centimètre » (Roland Lehoucq, Roland Lehoucq, *SF : la Science mène l'enquête*, éd. Le Pommier, Paris, 2007, p. 89).

À nouveau, le cas reste tout à fait théorique : avant d'envisager devenir un trou noir, un corps devrait notamment se débarrasser de ces particules de matière (ses fermions). Selon le principe d'exclusion de Pauli (voir note p. 124) la pression serait en effet trop grande. C'est donc déjà raté pour la Terre. D'autre part aucune répulsion électromagnétique ne serait envisageable, il faudrait des particules neutres.

[p. 60] « Ce serait une confirmation de la théorie des mondes multiples d'Everett » — Le physicien américain Hugh Everett établit en 1957 une théorie souvent appelée des « mondes multiples » (C'est en fait une des théories des mondes multiples parmi d'autre). En gros, celle-ci postule que l'onde de probabilité quantique ne s'effondre pas en laissant s'accomplir une seule issue (voir BD chapitre VI) mais que toutes les possibilités se réalisent dans des sortes de mondes superposés non conscients les uns des autres. Un peu comme on écoute des ondes d'une station de radio sans être conscients des ondes des autres radios qui sont pourtant présentes dans l'espace. La théorie « everettienne » d'une universalité de la fonction d'onde fit grand bruit, mais n'est aujourd'hui embrassée que par une minorité de physiciens. (Réf. princ. : Thibault Damour et Mathieu Burniat, *Le Mystère du monde quantique*, Dargaud éd., pp. 123-124 ; 150-151)

[p. 63] Leonard Mlodinow et Deepak Chopra, *War of the Worldviews*, Three Rivers Press, New York, p. 31 (éd. française : *Qui détient la clé de l'Univers ?*)

[p. 64] « S'il fallait réduire le monde... » — Richard Feynman, *Lectures on Physics, Six easy pieces*, chap. « Atoms in motion ». L'atome est défini comme la plus petite particule dans laquelle un élément peut être divisé sans perdre ses propriétés chimiques.

[p. 65] « À l'état fondamental, l'atome... » — Un atome dans son état fondamental compte un nombre égal de protons (charge +) et d'électrons (charge -). Dans ce cas, le nombre d'électrons correspond logiquement au numéro atomique déterminé par le nombre de protons. Mais les électrons peuvent voyager librement. Les électrons peuvent être ajoutés ou enlevés – ça s'appelle des « ions » –, mais l'élément lui-même ne change pas. Par exemple : 2 protons + 2 neutrons + 2 électrons = un atome d'hélium. Et 2 protons + 2 neutrons + 1 électron = toujours de l'hélium mais un ion hélium. Dans les métaux, les électrons se baladent comme ils veulent.

[p. 65] « et ainsi de suite jusqu'à 92... » — Tous les atomes se retrouvent sur le tableau périodique de Mendeleïev, du nom du savant russe qui eut l'idée de classer les éléments en fonction de leur masse atomique (nombre de protons et de neutrons). On admet communément que 92 atomes sont présents à l'état naturel sur terre... du moins en grande quantité. C'est en réalité un peu plus compliqué que ça.

La question reste débattue pour des atomes présents en quantité infimes, comme le neptunium (93).

Quant aux 26 autres, ils ont été créés par l'homme, les derniers avec des accélérateurs de particules, ressemblant à celui du CERN à Genève : « Par exemple, dans le cas de l'élément 113, on a bombardé du Bismuth (Bi) avec du zinc (Zn). Le nombre de protons de ces deux atomes, respectivement 83 et 30, s'est additionné : ça a donné l'élément 113 (...) Les éléments dit « transuraniens » - dont le numéro atomique est supérieur à celui de l'uranium (U) - se désintègrent pour la plupart après quelques minutes au mieux, au pire quelques millisecondes (...) La proportion entre protons et neutrons des « transuraniens » n'est pas optimale, raison pour laquelle l'atome se brise, ce qui leur vaut le qualificatif d'instable. »

(Réf. : Christian Bochet, professeur département de chimie de l'Université de Fribourg, Suisse, interview quotidien suisse *La Liberté*, 12 janvier 2016).

[p. 68] « **Aujourd'hui encore 9 atomes sur 10 dans l'univers...** » — *Atome Sweet home*, documentaire, France 5, 2015. L'idée du Vésuve page 69 est aussi inspirée de cet excellent documentaire sur l'atome.

[p. 69] « **Après un périple de 5 milliards d'années...** » — La galaxie d'Andromède est éloignée de 2,5 millions d'années-lumière. Si les débris expulsés de la supernova ont voyagé à une vitesse moyenne d'environ 150 km/s, soit 2 000 fois moins vite que la lumière, ils ont mis 5 milliards d'années pour passer de la galaxie d'Andromède à notre Voie lactée. Les débris arrivent durant la période du Précambrien qui s'est étalée entre - 4,5 milliards d'années et - 700 millions d'années.

[p. 72] « **L'atome est proportionnellement plus vide...** » — « The atom is emptier, relatively speaking, than the solar system », article « Quantum Fluctuations and Their Energy », Matt Strassler, physicien théorique, www.profmattstrassler.com. Un certain Ernest Lawrence, chercheur pionnier de l'atome de l'équipe d'Ernest Rutherford, fut le premier à comparer le noyau atomique à « une mouche dans une cathédrale ». L'expression est même le titre d'un livre éponyme retraçant la course à l'atome : *A Fly in a Cathedral* par Brian Cathcart en 2005.

[p. 72] « **... telles deux nébuleuses de poussières...** » — « Sans les charges électriques, les atomes pourraient, comme des galaxies, passer l'un à travers l'autre, indemnes. » (Timothy Ferris, *Coming of Age in the Milky Way*, p. 288, 2001. Cité in Bill Bryson, *op. cit.*)

[p. 74] « **Les quarks sont reliés...** » — Les protons et neutrons ne sont pas tout à fait les particules les plus élémentaires, puisqu'ils sont eux-mêmes constitués de trois quarks chacun, reliés par une force produite par les bosons appelés gluons (prédits en 1963 et découverts grâce à l'accélérateur du CERN en 1973), vecteurs de cette interaction forte (ou force nucléaire).

(Réf. : Guy Louis-Gavet, *La Physique quantique*, Éditions Eyrolles, 2012, pp. 144-145).

[p. 74] « **Les champs créés par ces particules virtuelles contribuent...** » — « (...) les quarks eux-mêmes fournissent très peu de la masse totale et les champs créés par ces particules contribuent à la plus grande partie de l'énergie et, ainsi, de sa masse. La même chose est vraie pour le neutron, et comme vous êtes faits de protons et neutrons, la même chose est vraie pour vous ! » (Lawrence M. Krauss, *A Universe from nothing, why there is something rather than nothing*, Simon & Schuster Ed., Great Britain, 2012, p. 70.)

La durée de 10^{-21} secondes mentionnée ici « est si petite qu'elle ne permet à la lumière de parcourir qu'environ un millième de la taille de l'atome d'hydrogène. » (dossier « Qu'est-ce que le vide ? », site futura-sciences.com, sept. 2015, Yves Sacquin, physicien expérimentateur.)

[p. 75] « **un bouillon turbulent...** » — Leonard Mlodinow, *op. cit.* p. 31.

[p. 75] « Cette mystérieuse énergie du rien... » — « Les structures que nous pouvons voir, comme les étoiles et les galaxies, ont toutes été créées à partir de rien par les fluctuations quantiques. » (Laurence M. Krauss, *op. cit.* p. 105).

[p. 77] « ... nous ne pouvons pas voir l'atome » — « Voir » des atomes signifierait regarder directement ou *via* un appareil optique, tel qu'un microscope optique. Les microscopes optiques ne permettent d'observer que des objets ayant des tailles de l'ordre du micromètre (d'où leur nom). Un micromètre correspond à un millionième de mètre. Or dans un solide, les atomes sont séparés par des distances de l'ordre du 0,1 milliardième de mètre (ou 0,1 nm). Il ne peut donc pas être « vu » optiquement. Cependant certains microscopes électroniques, qui ne sont pas optiques, peuvent donner une représentation des atomes. C'est le cas des microscopes à effet tunnel, développés au début des années 1980. (Réf. princ. : Klein Étienne, *Les Secrets de la matière*, éd Plon, 2015, p. 23-26/ C. Larue <http://larruephysiquechimie.blog.free.fr>)

L'atome cubique fut un modèle précoce de l'atome dans lequel les électrons étaient positionnés dans les huit coins d'un cube. Cette théorie fut développée en 1902 par un certain Gilbert N. Lewis. (art. « Cubical Atom », Wikipedia)

[p. 78] « ... il devrait donc perdre de l'énergie et s'écraser sur le noyau. » — Le physicien Étienne Klein explique avec humour cette problématique de l'électron qui, selon les lois physiques classiques, devrait s'écraser : « Du fait qu'il tourne autour du proton, l'électron subit une accélération radiale, tout comme une voiture dans un virage. Dans ces conditions les équations de l'électromagnétisme nous disent que l'électron, parce qu'il porte une charge électrique, perd de son énergie en émettant de la lumière (c'est sa façon à lui de faire crisser les pneus) (...) il y a là un hic gravissime : puisqu'il perd de l'énergie, l'électron se rapproche inexorablement du proton en suivant une spirale, jusqu'à finalement s'écraser sur lui (...) Mais (...) les atomes sont des édifices stables. » (Étienne Klein, *Petit voyage dans le monde des quanta*, éd. Flammarion, Paris, 2004, p. 10-11)

[p. 78] « Or les atomes émettent aussi un rayonnement lumineux... » — Les liquides, les solides et les gaz denses émettent un rayonnement lumineux lorsqu'ils sont chauffés. Ce rayonnement serait dû aux oscillations des atomes et des molécules. Tout corps à une température supérieure à 0 kelvin (zéro absolu, soit -273,15 °C) émet un rayonnement électromagnétique. C'est le rayonnement thermique ou rayonnement du corps noir.

[p. 79] «... ses orbites sont limitées, quantifiées... » — Le physicien danois Niels Bohr a quantifié les orbites de l'électron d'hydrogène. Il a trouvé des valeurs déterminées du *moment cinétique*. Imaginons que notre électron soit un caillou. Lançons-le : il acquiert une *impulsion* (« momentum » en anglais). Cette impulsion (P) sera égale à la masse de ce caillou fois sa vitesse : $P = M \times V$. La dérivée de cette impulsion par rapport au temps est la force qui agit sur ce caillou.

$$\text{IMPULSION (P)} = \text{MASSE (M)} \times \text{SA VITESSE (V)}$$

DU CAILLOU



Imaginons maintenant qu'au lieu de lancer le caillou en droite ligne, nous le faisons tourner autour d'un point : dès lors notre caillou acquiert un « moment cinétique » évoqué plus haut (« angular momentum » en anglais). Il est abrégé « L ». Pour calculer ce moment cinétique, il faut multiplier la masse par la vitesse (comme pour l'impulsion), mais cette fois aussi par le *rayon* du cercle.

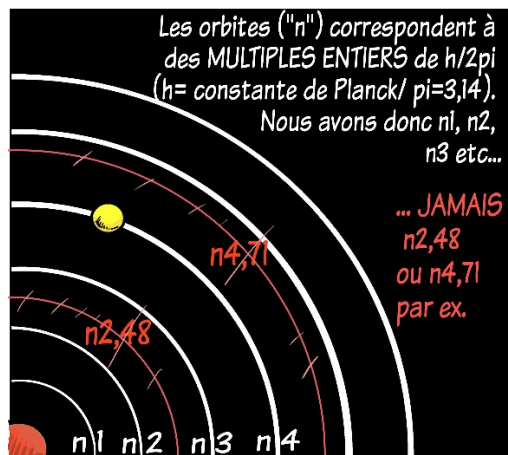
$$\text{Soit } L = M \times V \times R$$

On peut calculer le moment cinétique L1, mais aussi à des rayons différents : L2, L3, etc.

Comme il l'aurait fait avec un caillou, Niels Bohr a calculé le moment cinétique des électrons autour du noyau d'hydrogène. Il a constaté que les électrons ne se plaçaient que sur certaines orbites spécifiques n stables (les électrons n'y absorbent ou n'y rayonnent aucune énergie). Le moment cinétique sur ces orbites ($n1, n2, n3$ etc.) est un multiple entier de la valeur $h/2\pi$, où h correspond à la constante de Planck (voir note p. 80). Pour un électron e , le moment cinétique (L) sera donc :

$$L_0(e) = n \frac{h}{2\pi}$$

Il y a des orbites « $n1$ », « $n2$ », « $n3$ » etc. Jamais « $n2,863$ » ou encore « $n3,6982$ ».



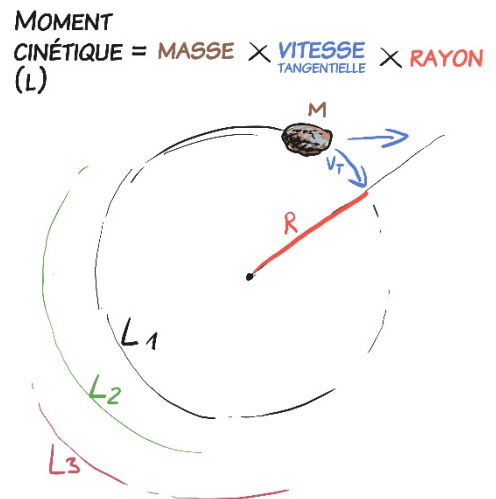
Le « saut quantique » explique à la fois les étranges spectres de rayonnement des atomes et pourquoi l'électron ne s'écrase pas sur le noyau. L'atome est stable car l'électron ne peut descendre d'un niveau qu'en émettant un morceau - ou quantum - d'énergie électromagnétique d'exactly la même valeur que la différence d'énergie impliquée entre les deux orbites. De la même manière, il ne peut sauter à une orbite supérieure qu'en absorbant un morceau d'énergie équivalent.

D'autres physiciens (Schrödinger, Heisenberg, Dirac, Jordan) démontreront plus tard qu'en réalité, les électrons n'ont pas une vitesse et un rayon orbital connus comme le décrit Bohr : les électrons sont dans un champ quantique probabiliste, comme toutes les particules d'ailleurs (voir notes suivantes). Toutefois, même si elles n'existent pas matériellement, les orbites définies par Bohr correspondent bien aux endroits où les électrons ont le plus de probabilité d'être trouvés.

(Réf. princ. : J. Al-Khalili et J. McFadden, *Life on the Edge, the Coming of Age of Quantum Biology*, p. 44/« Minute Physics : angular momentum », chaîne web scientifique.)

[p. 80] « L'électron passe ainsi d'un niveau à un autre... » — Graphique inspiré notamment de : John Gribbin, *La Physique quantique*, Pearson Education, 2007, p. 20-21. À noter que la série de quatre raies de couleur du spectre de l'hydrogène dans la lumière visible se nomme « série de Balmer ». Mais le spectre de l'hydrogène compte d'autres séries de « rayures » mais cette fois dans le rayonnement invisible : comme la série de Lyman (ultraviolet) ou la série de Paschen (infrarouge).

[p. 80] « Ce saut quantique est contraire... » — Le découvreur du saut quantique, Niels Bohr, a appliqué à l'atome les travaux précurseurs réalisés par l'Allemand Max Planck en 1900. Celui-ci avait trouvé que le transfert d'énergie se fait



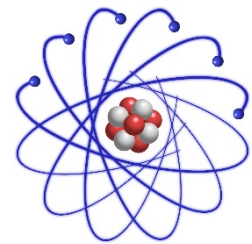
de façon discontinue - par paquets, par « quanta » - et non en continu comme le prédisaient les lois de la mécanique classique. Il pensait au départ n'avoir inventé qu'une simple astuce mathématique. Il avait tort : les quanta existent bel et bien.

Max Planck a introduit la constante h - ou quantum d'action - pour décrire la quantité d'énergie minimale « E » que peut avoir un oscillateur de fréquence f . Cette formule $E = hf$ est une sorte de « pixel » d'énergie, une quantité en dessous de laquelle on ne peut aller. Plus tard, Niels Bohr a donc repris cette constante h et démontré que le moment cinétique de l'électron (sa « rotation » autour du noyau, même si l'image est trompeuse) est un multiple entier de $h/2\pi$ (voir note p. 79). Cette quantité $h/2\pi$ apparaît si souvent en mécanique quantique qu'on lui a trouvé un symbole spécifique : \hbar , qu'on nomme « hbar », la constante de Planck réduite. Voir également note p. 124. (Réf principales : S. Hawkins – L. Mlodinow, *The Grand Design*, *op. cit.*, p. 116-117/site culturesciences.chimie.ens.fr)

[p. 80] « ... au fil des découvertes, l'atome ressemble de moins en moins... » — Graphique atome inspiré de « Évolution des trois principales structures de l'atome », Guy Louis-Gavet, *op. cit.*, p. 99.

[p. 80] « Le modèle planétaire ne montre... » — « Les problèmes posés par le modèle planétaire de E. Rutherford font état de l'impossibilité de modéliser l'atome de manière satisfaisante grâce à la mécanique classique. Néanmoins, la mécanique quantique restant obscure pour le plus grand nombre, le modèle planétaire demeure la représentation traditionnelle dans l'imaginaire populaire. » (culturesciences.chimie.ens.fr, *ibid.* chap. « L'expérience de Rutherford »)

Bien qu'inexacte, la représentation planétaire de l'atome reste largement usitée, même dans le monde de la physique théorique : ci-contre par exemple le logo de « Scientific Linux », un système open source émanant du « Fermi National Accelerator Laboratory », plus couramment appelé FERMILAB, équivalent américain du CERN à Genève.



[p. 83] « Voici que quelqu'un vous annonce... » — Leonard Susskind prononce ces mots dans la version documentaire télévisée adaptée du livre de Brian Greene : *The Fabric of Cosmos - The Quantum Leap* (épisode 3 – émission NOVA produite par la chaîne de télévision publique américaine PBS, 2012.) Depuis sa découverte, la physique quantique n'a eu cesse d'étonner par ces étrangetés. Richard Feynman, l'un des plus brillants physiciens du xx^e siècle, dira notamment cette phrase restée célèbre : « Je crois qu'on peut raisonnablement dire que personne ne comprend la physique quantique. »

[p. 86] « L'intensité de la figure d'interférence... » — John Gribbin, *op. cit.* p. 11.

[p. 86] « ... que la lumière est plutôt un solide... » — Les corpuscules ou quanta de lumière avaient été prédits par Einstein en 1905 déjà, comme nous l'évoquions dans le chapitre consacré à l'année miraculeuse du physicien p. 35. Durant des années, personne ne crut à l'existence des quanta lumineux avancée par Einstein. D'ailleurs, en 1913, l'Académie prussienne des sciences, tout en récompensant le physicien, tenta d'excuser ses égarements : « Il [Einstein] pourrait parfois avoir raté sa cible dans des spéculations, comme par exemple, dans son hypothèse des quanta de lumière. » (Manjit Kumar, *op. cit.*, p. 52)

Au début des années 20, beaucoup trouvaient encore absurde cette histoire de particules de lumière, notamment parce que la lumière était censée être une onde. Même Niels Bohr, père de la physique quantique : « Comme presque tout le monde, Bohr ne croyait pas à l'existence des quanta de lumière d'Einstein. Il acceptait, à l'instar de Planck, que la radiation était émise et absorbée en quanta, mais pas que la radiation elle-même était quantisée. » (*ibid.* p. 131). Il

fallut attendre 1923 et l'expérience d'Arthur Compton pour démontrer que les quanta de lumière étaient bien réels. Encore une fois, Einstein avait fait preuve d'une géniale intuition.

[p. 87] « ...on eut l'idée de retenter l'expérience... » — Nous prenons l'exemple des photons par souci de cohérence puisque nous parlons des caractéristiques de la lumière. En réalité, la première expérience de la double fente avec une seule particule à fois, menée par Clinton et Germer en 1927, utilisa des électrons et non des photons. Le premier laser à photons ne fut inventé que plus tard. Mais cela ne change rien au résultat : toutes les particules - électron, photon, neutron, proton ou même des atomes entiers - ont un comportement similaire.

[p. 90] « Comme si l'infiniment petit n'avait de réalité... » — L'affirmation selon laquelle l'infiniment petit n'existe que lorsqu'il est observé est un des fondements de l'interprétation dite de Copenhague, soit la vision standard de la mécanique quantique échaudée par Niels Bohr en 1927. Si cette interprétation fait encore référence aujourd'hui... c'est presque à défaut de mieux. Selon les physiciens Bruce Rosenblum et Fred Kuttner (*op. cit.*), l'interprétation de Copenhague permet au monde de la recherche d'éviter les questions dérangeantes, c'est le « squelette dans le placard » de la physique théorique. La barrière artificielle posée entre mondes micro- et macroscopique évite d'aborder des points délicats, notamment le rôle de la conscience dans l'observation des particules.

[p. 90] « ... possède en elle le cœur de la mécanique quantique » — Richard Feynman, *Six Easy Pieces (The Feynman Lectures on Physics)*, Basic Books, New York, chapitre « Quantum behavior », p. 116-117. À noter qu'on parle tantôt de « mécanique », tantôt de « physique » quantique. Si les termes sont souvent pris l'un pour l'autre, ils ne sont pas tout à fait synonymes. La « mécanique » (classique, relativiste, quantique) est la théorie de structure de la physique. La physique quantique est la partie de la physique où la mécanique quantique est pertinente.

Les particules élémentaires sont les plus petits objets physiques. Ces objets sont caractérisés principalement par une masse, un moment cinétique intrinsèque (le spin) et d'autres quantités comme la charge électrique. Ils se divisent en deux groupes distincts : la matière et les vecteurs de force de l'univers. Le premier groupe, est constitué des **fermions**, les particules de matière : les électrons et les quarks, soit l'ensemble des composants des atomes puisque, rappelons-le, les quarks composent les neutrons et protons, formant eux-mêmes le noyau des atomes (voir p. 62).

Le second groupe, ce sont les **bosons** : les particules d'énergie et d'interaction des quatre forces de l'Univers :

- La force électromagnétique « électrise » avec ses photons
- La force nucléaire forte « colle » les atomes avec les gluons
- La force nucléaire faible (faible par son rayon d'action) « radioactive » avec ses bosons W et Z
- La gravité, enfin, pourrait « peser » avec ses gravitons. Sauf que l'existence des gravitons reste encore hypothétique (Réf principales : sites web physik.uzh.ch et futura-sciences.com)

[p. 91] « ... se nomme principe d'indétermination d'Heisenberg » — Le terme principe « d'incertitude » est plus usité qu'« indétermination ». Mais cela soulève un problème de terminologie, comme l'expliquent S. Ortolí et J.-P.

Pharabod dans leur ouvrage *Métaphysique quantique* : « L'expression *principe d'incertitude* reste fermement établie dans les pays anglo-saxons (...) Plutôt que d'incertitude – ce qui renvoie quelque peu à nos imperfections -, il vaudrait mieux parler d'indétermination – qui se réfère plutôt à l'objet étudié. D'ailleurs le terme indétermination est systématiquement utilisé en Allemagne et en Italie. » (Sven Ortolí et Jean-Pierre Pharabod, *Métaphysique quantique*, p. 52)

L'Allemagne est du reste le pays d'origine de Werner Heisenberg, jeune chercheur surdoué qui découvrit le principe d'indétermination en 1927. C'est lui-même qui en attribua - à tort - la cause à la perturbation induite par le dispositif de mesure sur l'objet quantique étudié. Or comme indiqué dans la BD en page 92, le dispositif de mesure n'y change

rien, l'indétermination est une caractéristique intrinsèque au monde quantique. À noter qu'outre l'impossibilité de mesurer précisément en même temps la vitesse et la position d'un objet quantique, il existe également une relation d'indétermination portant sur l'énergie d'une particule et la variable temps. Autrement dit « l'indétermination dans l'énergie mesurée d'un système est inversement proportionnelle au temps passé à l'observer. » (Lawrence M. Krauss, *op. cit.* p. 71)

[p. 92] « ... une particule n'a jamais une position et une vitesse déterminée... » — Le physicien Guy Louis-Gavet utilise une autre image pour illustrer l'indétermination quantique : « La nuit, un oiseau chante dans un arbre. Si vous pouvez très bien analyser la mélodie de son chant, vous ne pouvez pas identifier l'oiseau (à moins d'être ornithologue). En revanche, si vous éclairez l'oiseau avec votre lampe électrique, il s'arrêtera probablement de chanter, mais vous pourriez le reconnaître. Vous ne pouvez pas, à la fois, décrire l'oiseau qui chante (assimilable à la position géographique d'une particule) et analyser ce qu'il chante (assimilable à la vitesse d'une particule). » (Réf. : Guy Louis-Gavet, *op. cit.* p. 85.)

[p. 92] «... on peut mesurer l'un puis l'autre, mais pas les deux en même temps. » — Richard Feynman dit que dans un certain sens, le principe d'indétermination d'Heisenberg « protège » la mécanique quantique et ses bizarreries (*op. cit.* p. 138).

En effet, une détermination précise de la position d'une particule confirme la nature corpusculaire de celle-ci et une détermination précise de sa vitesse confirme sa nature ondulatoire. Mais plus on essaie de déterminer la vitesse d'une particule, moins la mesure de sa position sera précise. Impossible dès lors d'avoir les deux informations en même temps, et donc de lever le voile sur la vraie nature du monde de l'infiniment petit... pour autant qu'il y en ait une. À défaut de cerner la nature du monde quantique, l'expression « dualité onde-corpuscule » est souvent utilisée pour le désigner. Expression que le physicien français Étienne Klein ne goûte guère. Selon lui, l'expression induit une confusion : une particule quantique n'est ni une onde ni une particule, mais « autre chose » qui n'a aucun équivalent dans notre monde macroscopique (Étienne Klein, *op. cit.* p. 52)

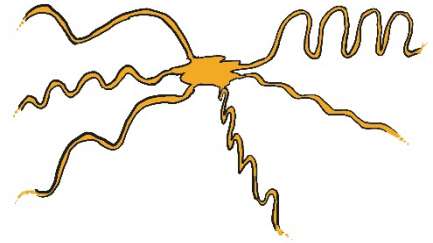
[p. 92] « Les crêtes se déplaçant... » — Brian Greene, *La Magie du cosmos*, *op. cit.*, p 126-127

[p. 95] « C'est une onde de probabilité... » — B. Cox et J. Forshaw, *op.cit.*, p. 46.

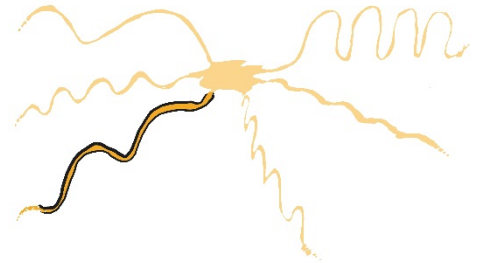
[p. 95] «... l'onde de probabilité emprunte tous les chemins possibles. » — Richard Feynman a décrit la probabilité quantique comme une « somme sur tous les chemins » (« sum-over-paths » ou « sum-over-histories ») appelé aussi « intégrale des chemins ». L'idée est qu'une particule - par exemple un électron - voyage d'un point A à un point B *via* un nombre de chemins possiblement infinis (y compris par Honolulu et Alpha du Centaure). Chacun de ces chemins aura une certaine probabilité de se produire qui lui est associée. L'idée de Feynman a été d'additionner toutes ces probabilités pour engendrer une sorte de moyenne, une amplitude de probabilité. Mais un électron passe-t-il réellement par tous les chemins ? Les physiciens n'ont pas de réponse. Reste que les calculs quantiques de ces moyennes donnent la probabilité qu'un électron heurte tel ou tel point sur l'écran avec une très grande précision (Réf. : B. Greene, *op. cit.* p. 224 / Brian Cox et Jeff Forshaw, *op.cit.*)

[p. 96] « Ajoutons donc des ondes de probabilité à notre bain à remous quantique... » — Erwin Schrödinger a défini en 1925 la fonction d'onde des atomes : Ψ (lettre grecque « psi ») satisfait l'équation de Schrödinger, elle prolonge le travail de De Broglie (voir BD p. 80). Disons simplement que cette onde Ψ dépend du temps et de variables repérant la position dans l'espace des différentes particules composant l'atome. Schrödinger a interprété le phénomène comme une sorte d'atome étalé. Il croit à une nature purement continue et ondulatoire de la matière, sans « quanta » (Réf : Thibault Damour et Mathieu Burniat, *op. cit.*, p. 80 et suiv.)

Mais Max Born, un autre physicien, contesta l'interprétation de Schrödinger. Born montra que Ψ est en réalité une onde de probabilité dont l'amplitude (la hauteur), ou plus précisément son carré, à un endroit donné, est la probabilité d'y trouver la particule, par exemple un électron. En fait, cette onde est une superposition d'une multitude d'ondes élémentaires, chacune décrivant une position possible de la particule.

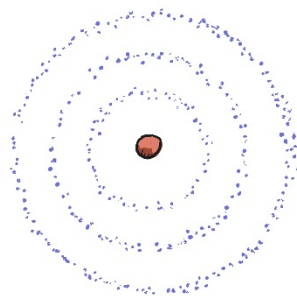


C'est seulement lors de la mesure que l'onde - et la probabilité correspondante - s'effondre pour ne choisir que sa composante élémentaire correspondant à la position mesurée. Impossible de déterminer quelle onde sera choisie, c'est aléatoire. La mécanique quantique (l'équation de Schrödinger) ne peut que prédire la probabilité avec laquelle un résultat de la mesure se réalisera si la mesure est effectuée à un temps donné. On ne peut « voir » une onde de probabilité, c'est une construction mathématique. (Réf. princ. : Guy Louis-Gavet, *op. cit.* p. 97)



Comment vérifie-t-on l'onde de probabilité ? Brian Greene nous l'explique : on calcule d'abord la probabilité que l'on attribue à la particule, par exemple un électron, dans un contexte expérimental donné. Puis on effectue à de multiples reprises des versions identiques de l'expérience, en relevant à chaque fois la position à laquelle on observe l'électron. Enfin, on compare les prédictions et les résultats de l'expérience : « Le nombre de fois que l'on trouve l'électron en un point donné devrait être proportionnel à l'amplitude (il est en fait le carré de l'amplitude) de l'onde de probabilité calculée en ce point. Des décennies d'expériences ont confirmé les prédictions de la mécanique quantique avec une précision extraordinaire. » (B. Greene, *op. cit.*, p. 117.)

[p. 96] « On peut calculer la probabilité de trouver... » — À noter que les équations de Schrödinger (voir note précédente) et la somme sur tous les chemins (trouvée plus tard par Feynman, voir note p. 95) sont deux moyens complémentaires de réaliser des prédictions en mécanique quantique. Toutes deux expliquent notamment les étranges orbites quantifiées des atomes prédites par Niels Bohr (dont nous parlons dans la BD en page 80). Ces orbites n'existent pas matériellement : selon l'équation de Schrödinger, elles correspondent en réalité aux endroits de l'atome où la densité de probabilité de trouver un électron est la plus élevée. (Guy Louis-Gavet, *op. cit.* p. 98/Wikipedia : « Schrödinger equation »).



La méthode Feynman des intégrales de chemin permet aussi de prédire les orbites quantifiées des électrons : « Avec chaque chemin entre A et B, Feynman a associé un couple de nombres. L'un représente l'amplitude, ou la hauteur, d'une onde. L'autre représente la phase, ou la position, dans le cycle (autrement dit, si c'est une crête ou un creux, ou quelque part entre deux). La probabilité de la particule allant de A à B est trouvée en additionnant les ondes pour tous les chemins reliant A et B. En général, si l'on compare un ensemble de chemins voisins, les phases ou positions dans le cycle différeront grandement. Cela signifie que les ondes associées avec ces chemins vont presque exactement s'annuler mutuellement. Cependant, pour quelques ensembles de chemins voisins la phase ne variera beaucoup entre

les chemins, et les ondes pour ces chemins ne s'annuleront pas. Ces chemins correspondent aux orbites permises par Bohr », écrit S. Hawking (S. Hawking et L. Mlodinow, *A Briefer History of Time*, Bantam Press, 2008, p. 99-100).

[p. 96] « Elle n'apparaît donc qu'ici ou là, au gré de mesures ponctuelles. » — Klein Étienne, *op. cit.* p. 36.

[p. 96] « Si la pomme de Newton était quantique... » — « Le principe d'incertitude décrit un flou inhérent qui doit exister dans toute tentative de décrire la nature. Notre description la plus précise de la nature doit être faite en termes de probabilités », écrit Richard Feynman (*Lectures on Physics*, chap. VI « Probabilités ») « Nous pouvons seulement prédire les chances [de trouver une particule à un endroit]. Cela signifie (...) que la physique a cessé d'essayer de prédire exactement ce qui va se passer dans des circonstances données. » (*Lectures on Physics*, chapitre « Quantum behavior », *op. cit.* p. 135.)

[p. 96] « Einstein écrira à Niels Bohr » — Kumar Manjit, *op. cit.* p. 125.

[p. 97] « Tous les chemins possibles s'effondrent... » — La perspective d'un monde quantique probabiliste et aléatoire catastrophisa Einstein. Le physicien prononça cette phrase restée célèbre : « Dieu ne joue pas aux dés ! » Pourtant, les expériences n'ont jamais pris la théorie quantique en défaut. Dieu semble bel et bien jouer aux dés. Précisons que la fonction d'onde de l'équation de Schrödinger ne « s'effondre » pas réellement : elle est juste un outil mathématique probabiliste. En effet, personne n'a jamais observé de particules dans un état indéterminé, fantomatique. Elles sont toujours situées à un endroit précis. La notion « d'effondrement » de l'onde de probabilité a simplement été introduite pour rendre compte de ce que rapportent les expériences. (Brian Greene, *op. cit.*, p. 246.)

[p. 97] « L'observation ne dérange pas seulement ce qui doit être mesuré, elle le crée. » — citation du physicien allemand Pascual Jordan l'un des fondateurs de la physique quantique (Kuttner-Rosenblum, *op. cit.* p. 129.)

[p. 98] « Faut-il une conscience... » — Un observateur conscient est-il nécessaire pour faire s'effondrer l'onde ? Pour une majorité des scientifiques, la réponse est non : la conscience n'a rien à voir là-dedans. Certains considèrent même que le simple fait de poser la question est déjà une intrusion métaphysique absurde, incompatible avec le domaine scientifique.

D'autres considèrent au contraire que la question de la conscience a été un peu trop vite rangée au placard. Parmi eux, citons le physicien mathématicien anglais Roger Penrose. Ou le plus emblématique défenseur du rôle de la conscience dans la physique quantique, soit le prix Nobel de physique Eugene Wigner : « Quand le domaine de la physique théorique a été étendu pour englober le phénomène microscopique par la création de la mécanique quantique, le concept de conscience est revenu au premier plan. Il n'était pas possible de formuler les lois de la mécanique quantique d'une manière pleinement consistante sans référence à la conscience », estimait-il.

En France, Bernard d'Espagnat, physicien et philosophe mort en 2015, développa de son côté le concept associé de « réel voilé ». En 1979, il écrivait : « La doctrine selon laquelle le monde est fait d'objets dont l'existence est indépendante de la conscience humaine s'avère être en conflit avec la mécanique quantique et avec les faits établis par l'expérience. » (« The Quantum Theory and Reality » in *Scientific American*, nov. 1979). Bernard d'Espagnat inspira Alain Aspect pour ses expériences en intrication quantique (voir note p. 106 notamment).

[p. 99] « Ce splitting d'onde est tout à fait usuel... » — « Tenir un atome dans une boîte sans perturber sa fonction d'onde serait certainement délicat, mais faisable. Diviser la fonction d'onde d'un atome en deux régions séparées est accompli dans chaque expérience d'interférence avec des atomes », précisent les physiciens Bruce Rosenblum et Fred Kuttner à qui nous empruntons cette version du chat de Schrödinger (B. Rosenblum et F. Kuttner, *op. cit.* p. 90-92). « Capturer des atomes dans des boîtes physiques n'est en fait pas nécessaire à notre démonstration. Une région

définie de l'espace est suffisante. (...) Nous pouvons considérer l'atome assis ici, attendant que nous choissions que faire avec lui, plutôt que d'avoir l'atome filant à travers deux fentes en chemin vers un écran de détection. » À noter qu'Étienne Klein cite un exemple similaire de particules mises dans deux boîtes et connu sous le nom de paradoxe de Broglie (*op. cit.* p. 84-87).

[p. 101] « En réalité, la théorie quantique ne pose aucune limite... » — « Comme la théorie quantique n'admet aucune frontière entre ce qui est petit et ce qui est grand, en principe chaque objet peut être en état de superposition ». B. Rosenblum et F. Kuttner, *ibid.* p. 151.

[p. 102] « L'information sur l'état quantique semble s'échapper... » — La vérification de la décohérence est récente. Elle fut l'œuvre de l'équipe du physicien Serge Haroche qui a réussi à reproduire matériellement le phénomène en laboratoire en 2007 à l'École Normale Supérieure de Paris. L'expérience a démontré comment une mesure effectuée sur des particules d'un système quantique déstabilise celui-ci. Étienne Klein écrit à propos de la décohérence : « Tout se passe comme si des bribes d'information sur leur état quantique s'échappait continûment dans leur environnement. Ce dernier agit en somme comme un observateur qui mesurerait les systèmes en permanence, éliminant ainsi toutes les superpositions à l'échelle macroscopique, donc aussi les interférences. Il engendre bien une décohérence. »

Il y a donc une sorte d'effondrement permanent de l'onde de probabilités. Une seule issue est choisie. Les physiciens soulignent toutefois que la décohérence n'explique pas tout : « Nous voilà encore face à la question de savoir comment une issue « gagne », et où « vont » alors les autres possibilités », écrit notamment Brian Greene (Réf. : Guy Louis-Gavet, *op. cit.* pp 155-156 / Étienne Klein, *op. cit.* p. 153 / Brian Greene, *op. cit.* p. 259)

[p. 106] « ... révélée par l'expérience dite du choix retardé... » — Le physicien américain John Archibald Wheeler fut le premier à imaginer l'expérience dite du choix retardé dès 1978. Pour des raisons techniques, celle-ci ne put être réalisée de façon parfaite que des années plus tard, notamment par Alain Aspect (déjà auteur d'une célèbre expérience sur l'intrication en 1982, voir note p. 128) et Jean-François Roch. Toutes les expériences confirmèrent les géniales prédictions de John Wheeler.

La variante résumée dans notre BD utilise un interféromètre (un appareil qui crée des figures d'interférences) dit « de Mach-Zehnder ». Avec l'interféromètre de Mach-Zehnder, un miroir semi-transparent fait office de séparateur, plus commode à utiliser que la double fente. Des miroirs réfléchissants complètent l'installation comme dans l'expérience du chat de Schrödinger décrite précédemment. Sven Ortoli et Jean-Pierre Pharabod en font une description précise dans leur ouvrage *Métaphysique quantique* (*op. cit.*, chap. II). À noter que dans notre illustration de l'expérience du choix retardé, nous avons conservé en visuel la double fente en guise de séparateur par unique souci de clarté.

[p. 108] « Tout se passe comme si... » — Brian Greene, *op. cit.* p. 231/« Ce qui semble importer au photon... » : Robert Lanza, *Beyond Biocentrism*, Benbella Books Inc., p. 70.

[p. 108] « Dès que le brouilleur est enclenché, l'onde revient. » — Nous faisons référence ici à la « gomme quantique à choix retardé », imaginée par les physiciens Kai Drühl et Marlan Scully en 1982. Aussi renversante que délicate à mettre en œuvre, l'expérience ne fut menée à bien qu'au début des années 2000. La version décrite dans cette BD - avec un brouilleur - en présente une vision très sommaire. Nous nous sommes notamment inspirés de la version décrite par Robert Lanza (*op. cit.* pp. 67 à 71) utilisant un « coincidence counter », une version déjà simplifiée. En condition réelle, le rôle du brouilleur décrit dans la BD prend la forme d'un montage élaboré de séparateurs et de miroirs Mach-Zehnder, mettant en jeu des photons intriqués : photon « signal » et photon « passif ». Voici son fonctionnement :

Dans l'image ci-dessous, le laser (« Start ») tire un photon qui passe par un premier séparateur (en rose). Il a une chance sur deux d'aller à gauche ou à droite. Disons qu'il emprunte le chemin gauche. Le photon arrive devant un « convertisseur » (en bleu). Celui-ci transforme notre photon en deux photons jumeaux intriqués : le photon « signal » et le photon « passif ». Chacun dispose de la moitié de l'énergie de l'original et partage les mêmes caractéristiques (voir chapitre VII sur l'intrication). Le photon jumeau « signal » suit le chemin qu'aurait pris le photon original vers l'écran d'interférence. Le photon jumeau passif poursuit quant à lui vers un autre séparateur. Il a une chance sur deux de suivre le chemin « A » jusqu'au détecteur 1. Sinon il poursuit la route « B » pour rencontrer un dernier séparateur. Celui-ci le mène au détecteur 2 ou au 3. Donc s'il emprunte le chemin gauche le photon « passif » sera détecté soit par l'appareil n° 1, soit le n° 2 ou alors le n° 3.

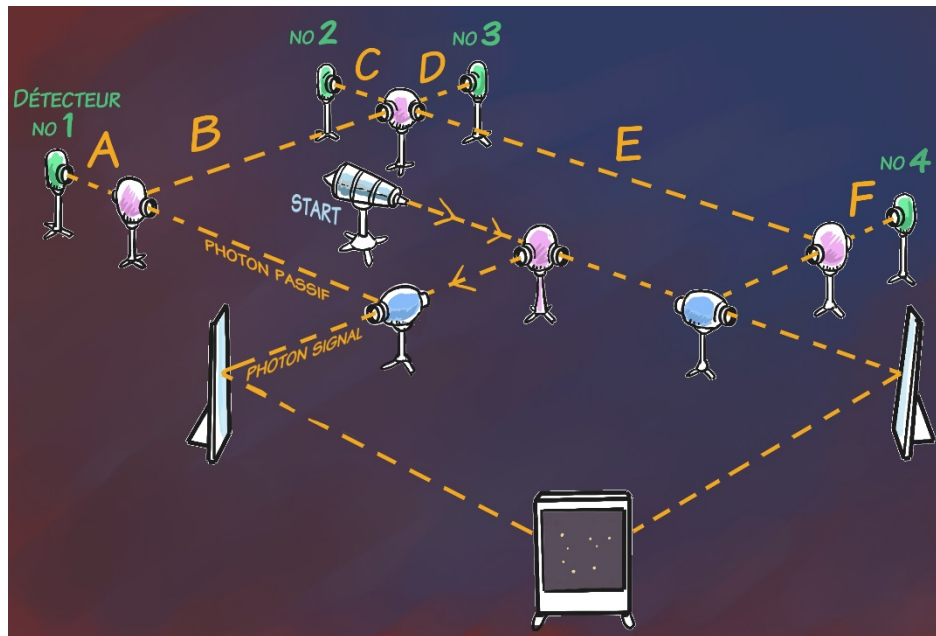
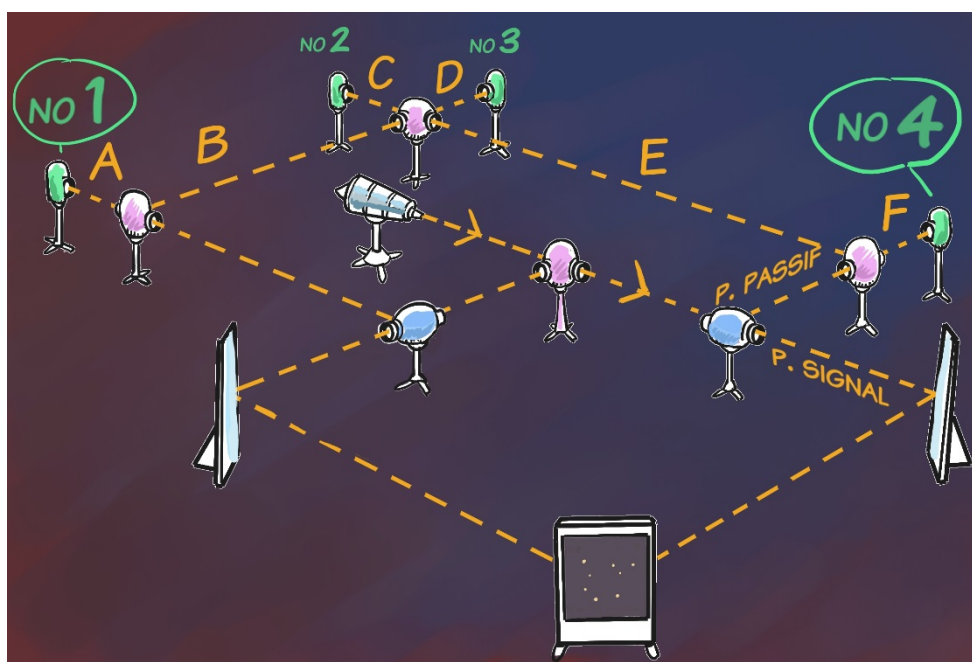
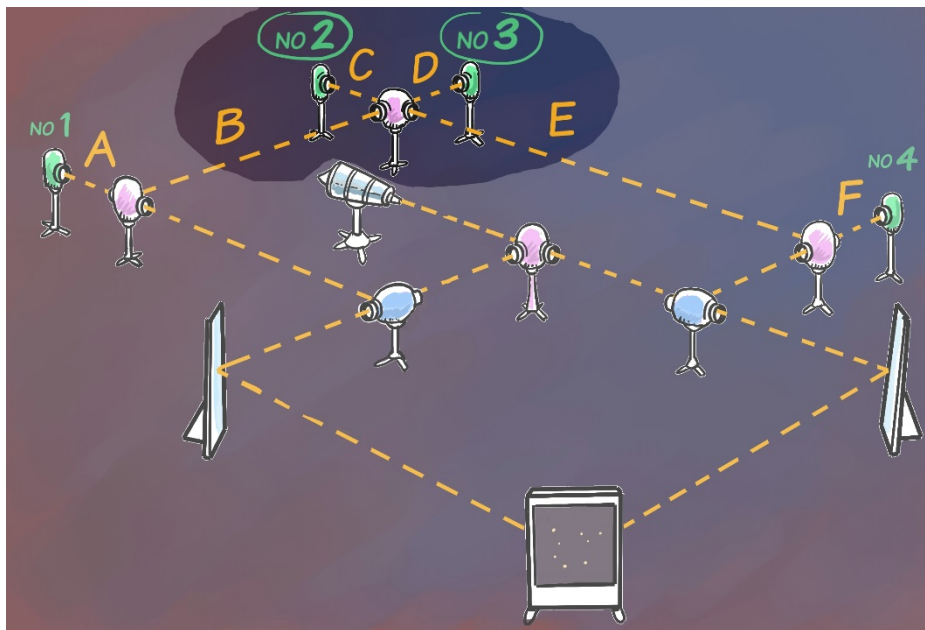


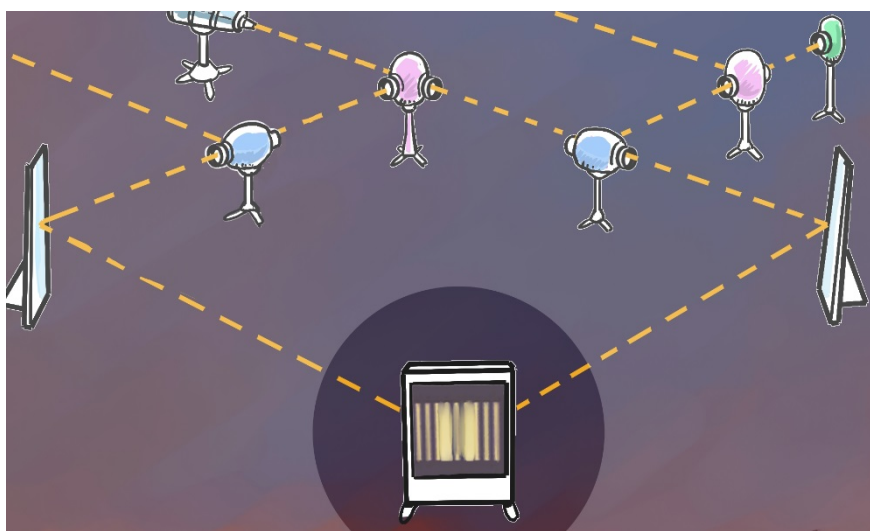
Image suivante : si le photon emprunte le chemin de droite, le scénario est identique. Il passera soit par la voie « F » pour finir au détecteur n° 4, ou suivra la « E » et tombera lui aussi sur le détecteur n° 2 ou le n° 3. Le photon signal continue, lui, sa route vers l'écran. En résumé : si le détecteur n° 1 s'allume, le photon est forcément passé par la voie gauche. Et si c'est le détecteur n° 4, alors il est passé à droite. Sur le n° 1 et le n° 4, l'information des chemins empruntés est connue.



Mais - et c'est là toute l'astuce - si un photon est détecté sur le détecteur n° 2 ou le n° 3, alors il a pu aussi bien passer via le chemin B que par le chemin E. Les détecteurs 2 et 3 ne disent pas si le photon est passé par la gauche ou par la droite. L'information sur le chemin suivi est donc gommée, brouillée (C'est ce système que nous avons résumé en un boîtier « brouilleur » dans la BD à la page 108). L'information du chemin suivi est inconnue pour les photons détectés par les appareils n° 2 et n° 3.

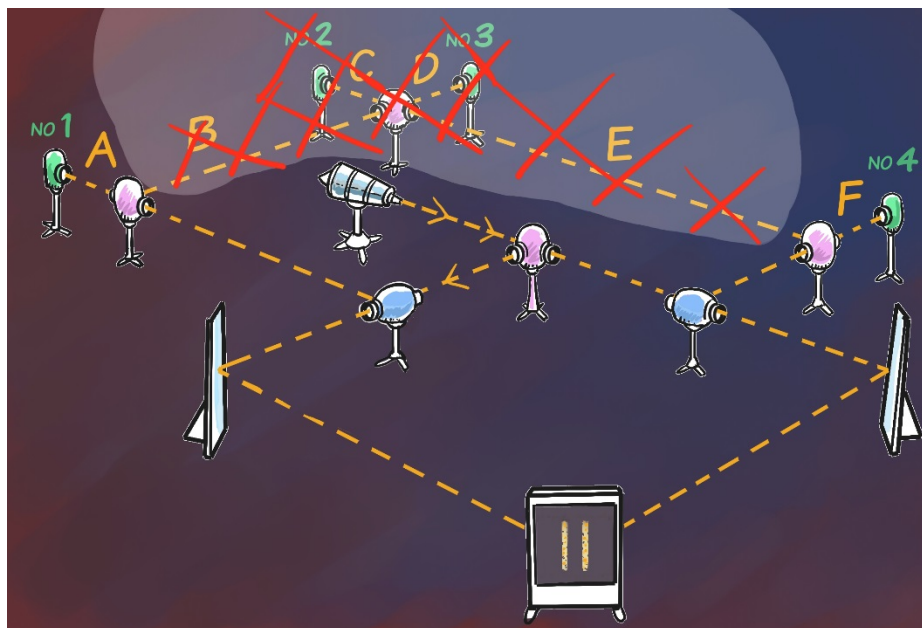


Sur l'écran, il va dès lors se produire un étrange phénomène. Chaque photon signal dont le chemin du photon passif est connu (observé en 1 ou 4), voit son onde s'effondrer, chacun s'est ainsi « matérialisé » en particule. Par contre chaque photon signal lié à un photon passif dont la connaissance du chemin a été gommée (appareils n° 2 ou n° 3), va former – lui - une figure d'interférence !



Le comportement du photon signal (celui qui arrive sur l'écran) a été influencé par le gommage d'information des chemins des photons passifs. Pourtant, il n'y a eu aucune interaction expérimentale avec le photon actif ! Plus étonnant encore : cette influence peut s'exercer bien après que le photon signal soit arrivé sur l'écran. Imaginons ainsi que l'appareillage « labyrinthe » (chemins B, C, D, E) avec les photons passifs soit éloigné du reste de l'installation d'une année-lumière. Eh bien, la connaissance ou non du chemin du photon passif « créerait » l'histoire appropriée sur l'écran d'interférences : 365 jours après qu'ils aient atterri sur l'écran, nous constaterions - grâce aux données des photons passifs arrivés après une année - que certains photons signal forment une figure d'interférences. Nous pourrions les repérer grâce à leur numérotation. On vérifierait par exemple que les photons 28, 35, 91, 193, 544, 822 etc. forment ensemble une figure d'interférences sur l'écran d'arrivée.

Mais maintenant supposons qu'après 364 jours – soit un jour avant de recevoir la transmission de données des photons passif - quelqu'un supprime toute l'installation de gommage de l'information en supprimant les détecteurs n° 2 et n° 3, ainsi que les chemins liés. Cela signifierait que nous pourrions ainsi connaître les chemins suivis par tous les photons. Résultat ? Il n'y aurait plus aucune trace d'interférences sur l'écran.



Le photon semble anticiper si un observateur - dans le futur - va connaître ou non l'information concernant son chemin. Le choix présent de l'observateur paraît influencer le passé. Le phénomène est déconcertant, mais les physiciens se gardent de dire que le passé a été « changé ». Le passé quantique n'est en effet pas « un », il existe en un hybride de possibilités : « le futur aide à façonner le récit que l'on fait du passé », explique Brian Greene.

Les résultats de l'expérience de la gomme quantique à choix retardé ont stupéfié le monde scientifique. Curieusement, constatent S. Ortolí et J.-P. Pharabod, son annonce est d'abord plutôt passée inaperçue, jusqu'à ce que le physicien Brian Greene et son collègue israélien Yakir Aharonov lui confèrent un certain écho. Depuis lors, la « gomme quantique à choix retardé » semble avoir modifié la vision des physiciens : « À la suite des expériences successives de Marlan O. Scully puis de Jean-François Roch [en 2007], et peut-être grâce à la publicité faite par Brian Greene, la question du temps en mécanique quantique est devenue une pierre de touche. (...) Et pour l'instant, on peut dire que, dans le domaine de la physique, l'histoire ne dépend sans doute pas seulement du passé : elle peut aussi être influencée par le futur. »

(Réf. : Brian Greene, *op. cit* pp. 238-243 : descriptif sur lequel nous nous sommes principalement basés/Sven Ortolí et J.-P. Pharabod, *op. cit.*, pp 106-110/Robert Lanza, *op. cit.*, p. 66-74/article « Delayed choice quantum eraser », Wikipedia).

[p. 109] « ... et montrer une forme de rétrocausalité... » — Dans le monde des sciences, la « rétrocausalité » est quasi un gros mot. En effet, la science classique - et le bon sens ! - reposent sur un principe inamovible, la « causalité » : il y a d'abord une cause, puis – ensuite - un effet engendré par cette cause. Cela n'est jamais à rebours, il y a un sens aux choses, une direction dans le temps. La physique relative déterministe d'Einstein ne dit pas autre chose : une cause détermine toujours un effet. Or voici que l'expérience quantique du choix retardé ou le phénomène de l'intrication semblent provoquer une « rétrocausalité », l'inverse de la causalité : l'effet peut précéder la cause. Les scientifiques trouveraient sans doute ça charmant si cela ne remettait pas en cause les fondements même de tout ce que dit la science depuis quelques millénaires.

Comment justifier le paradoxe de cette apparente rétrocausalité constatée dans les expériences quantiques ? La réponse pourrait résider dans la notion de « communication ». C'est du moins la réponse actuelle de la science. Explication : pour violer le principe de causalité, il faudrait « communiquer » plus vite que la lumière, et qui dit communication dit transmission de données. Or, dans le cas de l'expérience de la double fente, la particule n'est pas « réelle » ou incarnée tant qu'elle n'est pas observée. Aucune information n'a donc été « rétroactivement » envoyée à la particule puisque celle-ci n'existait pas réellement dans l'espace à ce moment, mais se trouvait juste à l'état de probabilité. Dès lors, même si cela ressemble à de la rétrocausalité, cela n'en est pas, le principe de causalité n'est pas violé.

Mais là encore, il n'y a pas unanimité sur la question. Certains physiciens estiment que la cause peut précéder l'effet. Bernard d'Espagnat ou encore Olivier Costa de Beauregard sont de ceux-là. Ce dernier considère qu'une particule peut effectivement envoyer un signal dans le passé : une « causalité rétrograde » remplacerait ainsi l'idée de « non-localité » (voir chapitre VII consacré à l'intrication). L'idée de Costa Beauregard ressemble à certains modes de calculs de l'électrodynamique quantique élaborés par Richard Feynman où des particules d'antimatière comme le positron (électron à charge positive au lieu de négative) remonteraient le cours du temps. Mais jusqu'à présent la théorie de Costa Beauregard n'a pas rencontré beaucoup de succès. Enfin, toujours concernant la rétrocausalité, mentionnons le cas spécial du photon qui ne connaît que l'instant présent : comme il voyage à la vitesse de la lumière, le temps n'a pas de prise sur lui, donc pas de passé, ni de futur.

(Réf. princ : S. Ortoli, J.-P. Pharabod, *ibid.* pp. 110-111/Lawrence M. Krauss, *op.cit.* p. 62 et sv./Wikipedia : art. « Delayed choice, Does delayed choice violate causality ? »)

[p. 110] « L'observation ne crée pas seulement une réalité... » — Bruce Rosenblum et Fred Kuttner, *op.cit.* p. 147. Un propos à rapprocher de celui du physicien allemand Pascual Jordan, l'un des pères fondateurs de la physique quantique : « Les observations ne dérangent pas seulement ce qui doit être mesuré, elles le créent », voir également note p. 97.

[p. 112] « Retardons notre choix d'observer... » — Il n'y a pas de temps limite entre le moment où la particule franchit la double fente et le moment où elle peut être détectée. Les chemins peuvent être aussi longs que l'on veut, et le détecteur pourra se trouver à une très grande distance du séparateur.

[p. 113] « Le médecin constaterait que la mort... » — Le chat enfermé durant huit heures est une version décrite par les physiciens Bruce Rosenblum et Fred Kuttner : « Si vous trouvez un chat mort, un examen par un vétérinaire légiste déterminerait que le chat est mort il y a huit heures. » (*op. cit.* p. 147). Précisons à nouveau que le chat de Schrödinger est une expérience théorique : pour la mettre en œuvre réellement, il faudrait respecter la « cohérence » quantique, et donc faire en sorte que tout le système et le chat soient isolés du monde, à l'abri de toute perturbation. Et ça, personne ne sait – encore ? - le faire.

[p. 114] « Pour cela, il faut : un quasar au fond de l'univers... » — Les quasars sont les astres brillants observables les plus lointains, sis au cœur de galaxies du fond de l'univers. Si l'on parvenait à recueillir suffisamment de photons issus du quasar, ceux-ci devraient former, sur une plaque photographique à longue exposition, une figure d'interférences semblable à ce que l'on obtient en laboratoire avec l'expérience de la double fente. Toutefois, la mise en œuvre d'une expérience de la double fente à l'échelle cosmique reste très complexe à mettre en place. Le SETI Institute, organisme actif dans l'astronomie, s'y est notamment essayé (Laurance R. Doyle, SETI Institute, « Quantum Astronomy, A Cosmic Scale Double-Slit Experiment », janvier 2005, sur www.space.com)

[p. 114] « Il constitue une myriade de filaments d'histoires possibles, dont une seule se concrétisera. » — Stephen Hawking et Leonard Mlodinow, article « The Elusive Theory of Everything », in *Scientific American*, octobre 2010/Brian Greene, *op. cit.*, p. 234

[p. 115] « Les seules choses qui existent... » — Robert Lanza, *op.cit.* p. 46

[p. 115] « Le fait que le passé... » — Stephen Hawking et Leonard Mlodinow, *The Grand Design*, *op. cit.*, p. 106.

[p. 115] « Il n'y a aucun moyen... » — Stephen Hawking et Leonard Mlodinow, *idid./ Brian Greene, op. cit.*, p. 228.
James Clerk Maxwell est connu pour avoir unifié en un seul ensemble d'équations l'électricité et le magnétisme. Il est considéré avec Newton comme un pilier de la physique classique.

[p. 116] « Dès lors comment le temps peut-il émerger... » — Guy Louis-Gavet, *op. cit.* p. 152

[p. 119] Nicolas Gisin, *L'impensable hasard*, p. 133 et p. 79.

[p. 124] « ... l'intrication concerne entre autres le spin... » — L'électron possède un **moment cinétique**, une « rotation » autour du noyau atomique sur un nombre limité d'orbites. Ce moment cinétique correspond à un multiple entier de $h/2\pi$, appelé aussi constante de Planck réduite : « \hbar » (symbole \hbar ; voir note p. 80).
Mais l'électron possède aussi un **moment cinétique intrinsèque** nommé le spin : trivialement dit, il gigote sur lui-même. Contrairement à la position ou à l'énergie, le spin quantique n'a pas d'équivalent classique. Il a bien un moment cinétique (un élan circulaire : la masse fois la vitesse de ce mouvement circulaire) et une orientation dans l'espace, mais l'analogie avec une vision classique s'arrête là. Une particule chargée en mouvement de rotation, c'est comme une bobine dans laquelle circule un courant électrique : un électroaimant. Le moment cinétique de l'électron est donc une mesure du champ magnétique que génère son mouvement. Lorsque les physiciens ont mesuré ce champ, ils ont remarqué que le moment cinétique total de l'électron n'était pas un multiple entier mais demi-entier de \hbar . Ce qui a amené le physicien Wolfgang Pauli à postuler pour l'existence du « spin » : le spin de l'électron est soit $-1/2$ de \hbar , soit $+1/2$ de \hbar .

On peut, comme le fait le physicien Gary Felder, comparer ce spin $-1/2$ de \hbar ou $+1/2$ de \hbar à des aimants avec un pôle Nord et Sud mesurable. Si on mesure selon un certain angle, le spin pourrait classiquement se fixer dans une direction « nord-légèrement est », « sud-plein ouest » ou autre fraction. Pas en mécanique quantique : quel que soit l'angle par lequel le spin d'un électron est mesuré, on obtiendra toujours exactement nord *ou* sud, jamais entre-deux, explique-t-il en substance. « Si l'on mesure le spin d'un électron selon un axe choisi au hasard, eh bien, on ne trouvera jamais une valeur de spin fractionnaire. Jamais. C'est un peu comme si la mesure elle-même forçait l'électron à rassembler tout son mouvement de spin, pour le diriger dans un sens ou dans l'autre », confirme Brian Greene. (Réf. princ. : Brian Greene, *op. cit.* p. 134-136/Gary Felder, article « Spooky Action at a Distance », 1999, felderbooks.com, p. 8/« Quantum Entanglement & Spooky Action at a Distance », par Veritasium, Youtube channel of science).

[p. 124] « Deux photons intriqués auront... » — Deux photons intriqués présenteront le même angle de polarisation. Chaque photon possède une sorte de direction, un angle de polarisation perpendiculaire à l'axe de propagation. Le soleil ou une ampoule, émettent des ondes lumineuses non-polarisées : elles vibrent, ondulent dans toutes les directions de façon anarchique avec une égale probabilité. Un peu comme un spin d'un électron allant dans tous les sens, dans un état indéterminé.

Dès qu'elle est reflétée, la lumière se polarise naturellement, sur des vitres, sur l'eau, les routes, etc. Les photons polarisés vont ensuite majoritairement vibrer dans un sens, en l'occurrence plutôt horizontalement. Il est possible de polariser la lumière selon un certain angle grâce à un filtre adapté : des lunettes de soleil par exemple. Grâce à un filtre à polarisation verticale, les lunettes bloquent les photons à angle horizontal (dont essentiellement ceux reflétés

par les vitres ou l'eau ; reflets les plus dérangeants pour l'œil). L'œil humain ne peut pas distinguer une lumière polarisée ou non. Il semble que les abeilles puissent le faire.

La polarisation est une forme particulière de spin : c'est un multiple entier de \hbar . Souvenez-vous (voir note précédente et note p. 90), les particules de matière que sont les *fermions* (électrons, quarks) possèdent un spin $1/2 \hbar$. Les vecteurs de force que sont les *bosons* (photons, gluons, bosons W et Z...) possèdent, eux, un *multiple entier* de \hbar . Le spin est une quantité additive, si bien qu'un assemblage de bosons est lui-même un boson (il donne toujours un multiple entier $1 + 1 + 1$ etc.), mais un ensemble de fermions peut former soit un boson, si les fermions qui le composent sont en nombre pair ($1/2 + 1/2 + 1/2 + 1/2 = 2$), soit un fermion dans le cas contraire ($1/2 + 1/2 + 1/2 = 1 1/2$). Ainsi un atome peut être soit un boson, soit un fermion, suivant la composition de son noyau.

L'air de rien, ces histoires de spin entier et de spin $1/2$ entier influe sur le caractère des deux types de particules. Ainsi, les bosons (spin entier) comme les photons par exemple, sont sociaux : ils aiment s'additionner, s'empiler au même endroit (pensons à un bouquet de lumière). Les fermions et leur spin $1/2$ entier préfèrent, eux, garder leur distance. Si deux électrons se trouvent sur la même « orbite » atomique, c'est-à-dire ont le même état spatial, leurs spins doivent être différents. Comme le spin de l'électron ne peut prendre que deux valeurs, $+1/2\hbar$ et $-1/2\hbar$, il ne peut pas y avoir plus de 2 électrons sur la même orbite : c'est le principe d'exclusion de Pauli. Ce principe est fondamental pour comprendre notre univers. Si toutes les particules élémentaires étaient des bosons, la matière telle que nous la connaissons n'existerait pas.

(Réf. princ. : Bruce Rosenblum et Fred Kuttner, *op. cit.* p. 160-161)

[p. 124] « Appelons-les Alice et Bob » — « Alice » et « Bob » sont les prénoms traditionnellement donnés aux particules lors des expériences sur l'intrication.

[p. 125] « ... alors ledit objet avait cette propriété depuis le début. » — Einstein s'étranglait face à ces pseudos « actions fantômes » et ironisa sur ce qu'il nommait les « forces vaudous » défendues par son ami Niels Bohr. Celui-ci était le gardien de « l'interprétation de Copenhague » soutenant qu'en l'absence de mesure, une particule n'a pas de position et n'existe même pas. Einstein trouvait ça tellement absurde qu'il lança en 1935, secondé de ses assistants Boris Podolsky et Nathan Rosen, une attaque qui fit grand bruit. Elle prit le nom paradoxe EPR (des initiales « Einstein, Podolsky, Rosen »), une démonstration théorique affirmant que les particules sont bien des éléments tangibles de la réalité, dotés de caractéristiques indépendantes de toute mesure. Le paradoxe mettait le doigt sur un phénomène qui à l'époque n'avait pas encore de nom puisqu'il n'avait pas vraiment été remarqué, l'intrication : des particules pouvaient s'influencer à distance plus vite que la lumière, ce qui est normalement impossible !

Le trio EPR fit de ce paradoxe le pivot de son argument : les particules avaient forcément des caractéristiques existantes au départ. « L'assaut EPR tomba comme un boulon du ciel bleu (...) Son effet sur Niels Bohr fut remarquable. », mentionne Manjit Kumar (Quantum, Einstein, *op. cit.* pp. 304-316) Bohr abandonna toute affaire courante pour se concentrer uniquement sur ce défi EPR lancé par Einstein. Les deux hommes passèrent les quelque vingt années suivantes à essayer de faire valoir leur point de vue. Les deux moururent sans connaître la vérité, mais on découvrit plus tard que Niels Bohr avait raison (voir notes suivantes). L'ironie est que le phénomène qu'on nommera plus tard « intrication », argument clé mis en lumière par Einstein pour son paradoxe EPR... s'est paradoxalement retourné contre lui.

[p. 127] « ... ont un spin opposé dans 100 % des cas. » — L'angle d'observation change le spin d'un électron, il force le spin en « Up » ou « Down ». Si on mesure la particule dix fois de suite selon le même angle (par exemple 30°) la particule produira effectivement toujours le même résultat, disons Up. Mais on ne dompte pas si facilement un électron : si on change d'angle (disons à 60°), il se produit une sorte de « reset » et la particule pourra être cette fois tout aussi bien être en spin Down. Idem si on revient à la première mesure à 30° , le spin ne sera plus forcément en

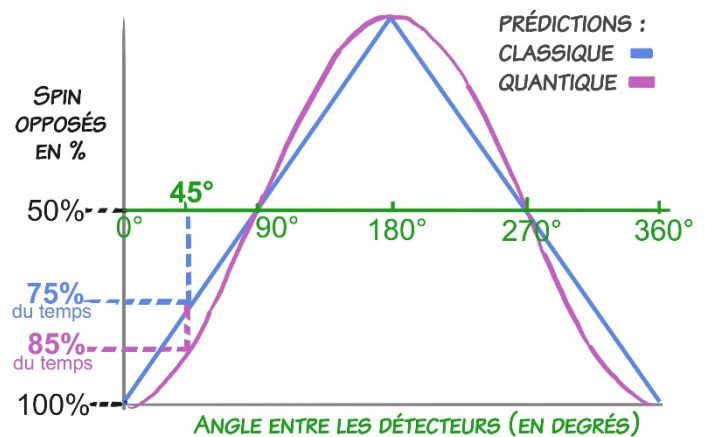
Up, il pourra aussi être Down, selon le bon vouloir de l'électron, répondant à une certaine probabilité (voir note suivante). Et il changera aussi l'état du spin de son jumeau. Cela fait partie des étrangetés quantiques. (Réf. Gary Felder, article « Spooky Action at a Distance », 1999, felderbooks.com, p. 5-11.)

[p. 128] « ... et s'influencent mutuellement à distance. » — Le physicien irlandais John Bell a imaginé son théorème en 1965. L'idée est de déterminer si les particules se comportent selon un « réalisme local », autrement dit comme n'importe quel objet classique (le point de vue d'Einstein). Ou comme l'affirme la théorie quantique (défendue par Niels Bohr) que les particules n'existent tout simplement pas avant leur observation.

Le tableau ci-après résume les points de vue, il calcule le pourcentage de corrélations des spins de deux particules mesurées à angles différents (le vert correspond à cette différence d'angle entre les deux) : la *prédiction classique* est linéaire (ligne bleue). La *prédiction quantique* prévoit au contraire une onde sinusoïdale (courbe violette). Elle correspond à la probabilité de corrélation suivante (où θ est l'angle) :

$$P = \cos^2(\theta/2)$$

Sur le tableau ci-contre, nous voyons que le désaccord est le plus visible à une différence d'angles de 45° entre les 2 détecteurs : la physique classique y prédit une corrélation maximale entre les spins des 2 particules intriquées de 75 % et la physique quantique de 85 %. (Vous pouvez tester sur votre calculatrice : divisez l'angle par 2, soit = 22,5. Puis taper la fonction « cos » et 22,5. Mettez le résultat 0.9238 au carré, et vous obtenez 0.8535, soit 85 %)



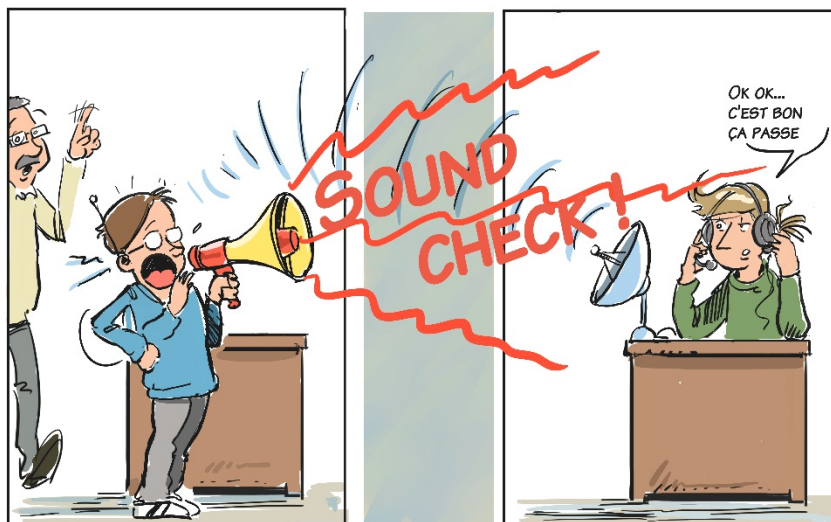
Pour déterminer quelle est la bonne prédiction, John Bell imagina une sorte de jeu, où le but est d'obtenir maximum de corrélations entre 2 particules (par ex. : obtenir le plus souvent possible des spins opposés lors des mesures à différents angles.) Son jeu est basé sur un contexte de « réalisme local » : autrement dit, on exclut toute intervention divine, vaudou ou fantôme à distance. Dans ce cas de réalisme local, il est mathématiquement impossible d'obtenir des corrélations « = » à 100 %. Elles seront seulement forcément « ≤ » à 75 %, (« plus petites ou égales à » : c'est l'inégalité en question). Si ce pourcentage de 75 % était dépassé, alors l'inégalité de Bell serait violée et cela confirmerait les prédictions quantiques, donc qu'il y a bien d'étranges actions fantômes à distance entre les particules. La physique quantique prédit rappelons-le des corrélations allant jusqu'à 85 %.

Pour illustrer simplement l'esprit du théorème de Bell, imaginons que les deux particules soient deux écoliers, placés dans des bâtiments éloignés. Ces deux écoliers doivent répondre à deux questions : la question « Y » ou la question « Z » (l'équivalent des deux angles de mesure des particules) en donnant deux réponses à choix : « oui » ou « non » (l'équivalent des spin up ou down). On leur pose les questions plusieurs fois de suite, dans un ordre aléatoire. Les écoliers ont le choix de répondre alternativement « oui » ou « non » comme ça leur chante.



En suivant certaines règles de corrélation entre les oui/non, ils peuvent récolter un maximum de points. Ces règles sont connues à l'avance, les élèves peuvent donc développer une stratégie avant d'être interrogés. L'une des règles stipule : « si l'un des élèves répond non à Y, l'autre doit toujours répondre non à Z ». La stratégie pour gagner des points est simple dans ce cas : il suffit aux deux écoliers de convenir que l'un des deux réponde toujours « non » à la question Z. Ils sont ainsi sûrs d'être gagnants à tous les coups. Une autre règle stipule : « À la question Z, vous devrez parfois répondre oui tous les deux ». Là il y a un problème : cela contrevient à la stratégie adoptée pour la première règle, où l'un des deux écoliers avait convenu de toujours dire non à Z. Or voilà qu'il doit parfois dire oui ! Conclusion : les écoliers auront beau développer à l'avance les stratégies les plus abouties, il est *impossible* de gagner à *tous* les coups.

On retrouve ici l'esprit de l'inégalité de Bell : quelle que soit la stratégie adoptée, on ne peut gagner au jeu de Bell que partiellement, en l'occurrence 3 fois sur 4 maximum, 75 % du temps si on suit une stratégie « réaliste locale ». Les écoliers auraient bien une solution pour augmenter leur chance : *tricher* !



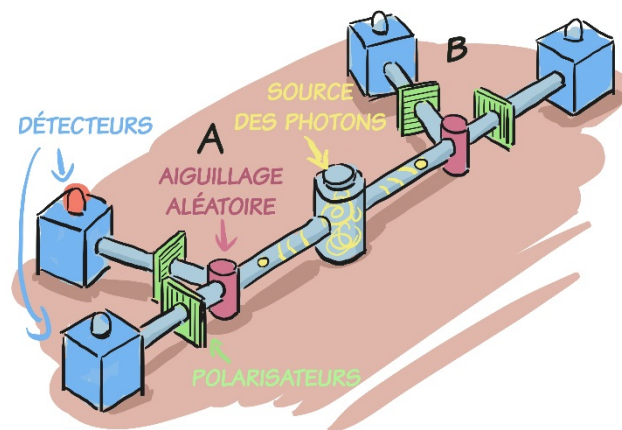
Les écoliers pourraient tricher en s'envoyant un signal indiquant à l'autre quelle question a été posée, par exemple « j'ai répondu oui à la question B, tu peux répondre oui ». Mais comment envoyer un signal quand on se trouve dans des bâtiments éloignés (et évidemment sans disposer d'appareillage électronique ou équivalent) ? C'est impossible. C'est pourtant l'exploit que semblent accomplir deux particules qui « s'influencent » mutuellement à distance au moment où elles sont mesurées : elles peuvent « gagner » 85 % du temps au jeu de Bell. Les scientifiques se demandent encore quelle « tricherie » les particules utilisent pour être ainsi corrélées.

L'exemple des écoliers donne une simple idée de la logique utilisée par le théorème de Bell. Le théorème est beaucoup plus complexe et existe en différentes versions, plus ou moins imagées (Bell lui-même illustra son théorème avec les chaussettes roses du Dr Bertlmann qui devait subir différents lavages.) À noter que Nicolas Gisin fait une description précise et rigoureuse du théorème de Bell dans son ouvrage *L'impensable hasard*.

Étonnamment, le travail de Bell faillit passer inaperçu. Il ne fut exhumé que grâce à un jeune étudiant américain tenace, John Clauser. Tombé par hasard sur les travaux de Bell, Clauser va de surcroît s'évertuer à en tester le théorème en laboratoire contre l'avis de ses professeurs.

(Réf. princ. : Nicolas Gisin, *op. cit.*/Scott Aaronson, art. sept 2015, « Bell Inequality finally done right » (scottaaronson.com)/Sven Ortoli et J.-P. Pharabod, pp. 80-88, *op. cit.*/Quentin Ruyant, « Philosophie des sciences », blogspot (idée des écoliers)/« Quantum Entanglement, Bell Inequality, EPR paradox », Physics, Videos par Eugene Khutoryansky/ «Quantum Entanglement & Spooky Action at a Distance », par Veritasium, (Youtube channel of science), *op. cit.*

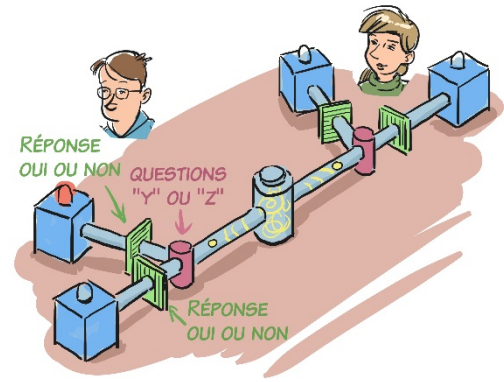
[p. 128] « Des corrélations non-locales... » — John Clauser fut le premier à vérifier la non-localité des particules en développant le test dit CHSH (pour Clauser, Horne, Shimony et Holt), dérivé du test de Bell (voir note précédente). Mais en 1972, Clauser est limité par la technique de son époque : il ne dispose que d'un four à ultra-violet. Ce n'est plus le cas dix ans plus tard avec Alain Aspect : l'équipe du physicien français est la première à tester de manière fiable - avec un laser - l'intrication et les inégalités décrites par Bell. Le principe est le suivant : on excite (chauffe) des atomes de calcium pour faire monter les électrons en énergie, en orbites hautes. En se « désexcitant », c'est-à-dire en tombant de deux niveaux énergétiques (deux orbites), l'électron de calcium peut émettre une paire de photons intriqués - A et B - qui seront lancés dans deux directions opposées.



Le long de sa trajectoire, le photon A passe par un aiguillage ou « switch » optique qui modifie sa direction aléatoirement vers deux chemins avec deux polarisateurs à angles différenciés. Il ira vers l'un ou l'autre aléatoirement et, selon son angle de polarisation, passera le polarisateur ou sera stoppé. Les détecteurs en bout de course indiquent si le photon a passé ou non. Le même système de filtres est disposé pour le photon jumeau B. Le but de tout ce système est de mesurer quelle est la corrélation de comportement entre les deux photons intriqués A et B. Alain Aspect mesura ainsi des dizaines de milliers de photons jumeaux A et B. Ce test prouva que lorsqu'un photon A passait avec une polarisation donnée, le photon B jumeau qui voyageait dans la direction contraire pouvait adopter instantanément un comportement corrélé, c'est-à-dire une polarisation identique. Ce taux de corrélation élevé ne pouvait être expliqué mathématiquement : le photon jumeau adaptait son comportement à celui de son partenaire sans que cela puisse être expliqué par des variables locales (une communication ou des caractéristiques préexistantes). « L'existence du mécanisme de l'intrication quantique, c'est-à-dire d'un phénomène non local où deux

particules s'influencent l'une l'autre instantanément, fut sans équivoque démontrée », écrit le physicien Massimo Teodorani.

À noter qu'on retrouve la logique de notre exemple des écoliers et du jeu de Bell. A et B représentent les écoliers. L'aiguillage aléatoire correspond aux questions Y ou Z aléatoirement posées par les professeurs. Et le fait qu'il passe le polarisateur ou au contraire soit stoppé équivaut aux réponses des écoliers : « oui » ou « non ».



En 1997 et 2008, le physicien suisse Nicolas Gisin renouvela l'expérience sur des photons distants cette fois de plusieurs kilomètres. D'autres suivirent. Et tous les résultats confirmèrent les prédictions quantiques de « corrélations non-locales », et non les prédictions classiques soutenues par Einstein. Le plus piquant est qu'à la base tout le monde voulait donner raison à Einstein, John Bell compris. Malheureusement, Einstein et Niels Bohr moururent respectivement en 1955 et 1962 sans connaître la vérité sur ces fameuses actions fantômes à distance qui les opposaient.

(Réf. princ. : Massimo Teodorani, *Entanglement, l'intrication quantique des particules à la conscience*, Macroéditions, Cesena, Italie, 2015, pp. 23-25/Sven Ortoli, J.-P. Pharabod, *ibid*, p. 80-83/vidéo : « Quantum Entanglement & Bell's Inequality Violation Verified by Alain Aspect », Youtube/Nicolas Gisin, *op. cit.*)

[p. 129] « ... ont produit ensemble un code qui s'est matérialisé » — C'est ainsi que fonctionne le principe de la *cryptographie quantique* : trouver des résultats au hasard, mais identique chez Alice et Bob permet « de produire à tout moment une suite de résultats qu'ils peuvent immédiatement utiliser comme une clé de codage », indique Nicolas Gisin (*op. cit.* p. 95-96 et 147). Dans son application pratique, plutôt que de méthode de « cryptage », il faut plutôt parler d'une « distribution quantique de clés », en l'occurrence des impulsions lumineuses voyageant le long de fibre optique.

Voici le principe : si une communication consiste en un message transmis sur une balle de tennis, il serait facile pour un intrus d'intercepter la balle et lire le message inscrit. Au lieu de balles, imaginons que nous utilisons des bulles de savon (représentant les impulsions lumineuses de clés quantiques), toute interception ferait éclater la bulle (perturberait le photon et révélerait l'intervention d'un tiers). Le système est ainsi inviolable. La *cryptographie quantique* développée par l'équipe de Nicolas Gisin, fut parmi les premières à être exploitée à un niveau industriel via l'entreprise ID Quantique, une émanation de l'Université de Genève. (Source : Université de Genève, « info cryptographie quantique »)

La *téléportation* utilise elle aussi le principe de l'intrication. En téléportation quantique, on ne téléporte pas l'objet (la substance), mais seulement son état quantique (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 vibrations potentielles. » Pour imager le principe de la téléportation quantique, Nicolas Gisin compare un photon à un canard en pâte à modeler : disons qu'Alice (« A ») possède un tel canard sculpté. Elle décide de le téléporter vers Bob (« B »). Chez ce dernier une pâte informe (la substance) est initialement présente. « 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 la fin du processus de téléportation, la pâte de Bob acquiert l'exacte forme du canard initial, exacte jusqu'au moindre détail atomique. » (*ibid.* p. 100-101).

À noter qu'en été 2017, une équipe chinoise a annoncé avoir porté à plus de 1 000 km le record de distance d'intrication, cryptographie et téléportation quantique, notamment entre la Terre et le satellite Micius. Le record précédent était d'une centaine de kilomètres par fibre optique.

[p. 131] « Il est ensuite impossible de réduire à nouveau... » — Le physicien Étienne Klein évoque l'entremêlement des ondes dans son ouvrage *Petit voyage dans le monde des quanta*. Rappelons que la fonction d'onde des particules quantique découverte par E. Schrödinger est notée Ψ , soit la lettre grecque psi. (voir également note p. 96). Étienne Klein préfère, lui, parler de « vecteur d'état » plutôt que de « fonction d'onde » (« une ancienne terminologie, plus concrète, mais de moindre portée »), mais l'idée est la même.

Le « vecteur d'état », donc, de la particule 1 dans un état « a » (spin, polarisation, etc.) se multipliant à celui la particule 2 dans un état « b » donne le « vecteur d'état de la paire » suivant :

$$\Psi_{12} = \Psi_1(a) \times \Psi_2(b)$$

Si les particules ont un état inverse, le vecteur d'état de la paire donne ceci :

$$\Psi_{21} = \Psi_2(a) \times \Psi_1(b)$$

« Est-ce la particule 1 qui est dans l'état « a », ou bien la particule 2 ? Les deux particules étant indiscernables, il est impossible de le dire *a priori* », écrit Etienne Klein, « La seule chose certaine, c'est que les deux hypothèses sont également possibles. Dès lors en vertu des bons principes quantiques, en l'occurrence du principe de superposition, nous devons écrire que le véritable vecteur d'état de la paire est la somme des vecteurs d'état correspondant à chacune des deux possibilités » :

$$\Psi_{paire} = \Psi_{12} + \Psi_{21}$$

« L'entremêlement que nous évoquions plus haut apparaît ici clairement. Bien que les deux particules n'interagissent pas, on ne peut pas, dans un tel vecteur d'état, isoler d'un côté ce qui revient à la particule 1 et de l'autre ce qui revient à la particule 2. » (*op. cit.*, pp. 89-96)

[p. 131] « ... surgir de l'extérieur de l'espace-temps... » — Nicolas Gisin, *op. cit.* p. 145 : « 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. ».

[p. 131] « Des hypothèses évoquent à nouveau... » — Avec la rétrocausalité, les particules pourraient envoyer des signaux dans le passé, comme si le temps n'existe pas : dans le cas de l'intrication, le choix d'Alice rétroagirait sur la source d'intrication, qui à son tour agirait sur le système quantique de Bob. Certains physiciens défendent cette idée de rétrocausalité : voir note p. 109.

Quid d'une vitesse supraluminique ? L'hypothèse de particules voyageant à une vitesse supérieure à la lumière est apparue au début des années 60. Les tachyons en sont les emblématiques représentants, abondamment utilisés en science-fiction. Des expériences comme celle menées notamment par Nicolas Gisin en 2008 avec des photons éloignés de plusieurs kilomètres, excluent toute influence jusqu'à 50 000 fois la vitesse la lumière. Mais au-delà ? Peut-être existe-t-il une vitesse encore beaucoup plus grande que cela : « 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) » écrit Nicolas Gisin. Sur cette base, pourquoi ne pas imaginer que la prochaine vitesse soit à nouveau un million de fois plus grande ? Si Nicolas Gisin veut bien se hasarder à poser la question, il réfute l'existence d'une telle vitesse (*op.cit.* p. 124 et pp. 141-143). À ce jour, il n'existe aucune preuve d'une vitesse supraluminique.

[p. 131] « Pour le physicien israélien... » — Bill Bryson, *op. cit.* p. 147.

[p. 132] « Les particules peuvent s'intriquer... » — Les particules s'intriquent « si elles sont proches et que leurs propriétés peuvent devenir corrélées. » (Brian Greene, *La Magie du Cosmos*, Nova Films, 2011).

[p. 133] « Tous les objets quantiques ayant interagi... » — « En principe, tous objets qui ont une fois interagi sont intriqués à jamais et ainsi ce qui arrive à l'un influence l'autre (B. Rosenblum et F. Kuttner, *op.cit.*, p. 188).

[p. 133] « En réalité plusieurs objets peuvent être intriqués. » — L'intrication de deux objets quantiques est presque « trop simple », confiait Nicolas Gisin au magazine *Science News* en 2010, « Et cela m'a pris un moment pour dire ça ». Pionnière en intrication, son équipe à l'Université de Genève parvient à intriquer toujours plus de particules. En 2013, elle est parvenue à intriquer « deux fibres optiques dotées de 500 photons ». En octobre 2017, elle a réussi à prouver l'intrication de 16 millions d'atomes au sein d'un cristal d'un centimètre de côté (voir également note p. 145) (Réf. : Univ. de Genève, press release, 25 juillet 2013 et octobre 2017/art. « Everyday Entanglement », *Science News*, nov. 2010).

[p. 134] « L'intrication naturelle peut également... » — « Tous les électrons dans les atomes sont intriqués. Le plus simple des systèmes électronique est celui à deux électrons dans l'hélium », écrit Mirjana Bozic, de l'Institut de Physique de Belgrade. « Tous les électrons dans les atomes et les molécules sont intriqués. L'état quantique de systèmes à multi-électrons ont été largement étudiés en physique atomique, tous ces états sont intriqués. » (Réf researchgate.net, post : « Are there natural entangled particles ? »).

[p. 134] « ... c'est par exemple le cas de l'atome de calcium. » — Les premières expériences vérifiant le phénomène d'intrication ont justement utilisé des atomes de calcium pour produire des paires de photons jumeaux. Le principe est de chauffer les atomes en les bombardant de photons pour faire monter les électrons en énergie, en orbites hautes.

Le calcium a depuis été abandonné au profit d'autres procédés plus fiables. L'un d'eux consiste à projeter un rayon laser de lumière ultraviolette contre un type particulier de cristal, appelé « cristal non linéaire » constitué de borate de baryum : en passant dans le cristal, le photon laser à haute énergie a des chances de se scinder en deux photons d'énergie plus faible, et intriqués. Ce fut la technique utilisée par Nicolas Gisin en 1997, avec des photons distants de près de 11 km de distance.

À noter d'ailleurs que la plupart des expériences quantiques ont été effectuées sur des photons, plus commodes à manier. Les photons n'ont pas un demi-spin mais un spin entier, et l'on parle plutôt de polarisation car associée à la polarisation de la lumière, comme indiqué dans de précédentes notes.

(Réf : Massimo Teodorani, *op.cit.*, pp. 23-25)

[p. 135] « Grâce à ce rayonnement, les électrons... » — Les électrons (charge négative) se détachent d'autant plus facilement qu'ils sont loin du noyau (protons de charge positive). À noter que le rayonnement vert ne pénètre pas mais est reflété, cela expliquerait la couleur verte des plantes.

[p. 135] « Or, ces électrons semblent évoluer en mode superposé... » — En mars 2016, notamment, la revue *Nature* relate l'expérience de scientifiques chinois qui ont observé des phénomènes d'intrication sur des chromophores, molécules ayant la capacité de changer de couleur suite à une excitation lumineuse (magazine *Nature*, 30 mars 2016, « Visualizing coherent intermolecular dipole-dipole coupling in real space »).

Les scientifiques parlent souvent de « cohérence quantique », notamment dans l'expérience chinoise de mars 2016. « cohérence » et « intrication » sont intimement liées. La cohérence traite l'idée que les objets quantiques ont des propriétés ondulatoires. Si un objet ondulatoire est divisé en deux, alors les deux vagues résultantes vont interférer de manière « cohérente » pour former un seul état de superposition. L'intrication implique elle aussi la superposition. Mais dans ce cas, les états en superposition sont les états partagés de deux particules intriquées. (Réf. : « Physicists find quantum coherence » et « Quantum entanglement are two side of the same coin », *in* phys.org, abstract of Alexander Streltsov « Measuring Quantum Coherence with Entanglement in Physical Review Letters, 2015).

[p. 136] « D'autres effets quantiques pourraient participer à notre biologie... » — Cela fait longtemps que des scientifiques soupçonnent certains phénomènes biologiques d'être expliqués via des processus quantiques. Erwin Schrödinger lui-même y fait déjà allusion dans son livre *Qu'est-ce que la vie ?* (Cambridge University Press, Londres, 1944). Le véritable essor de la biologie quantique est lui, beaucoup plus récent. Longtemps confiné au vide proche du zéro absolu, certaines expériences quantiques actuelles peuvent se rapprocher de conditions en milieu plus chaud proche des conditions de vie organique sans que l'onde quantique ne s'effondre, constatent Bruce Rosenblum et Fred Kuttner (*op.cit.*, pp. 194-199).

Outre la cohérence et la superposition quantique évoquées pour la photosynthèse, des enzymes utiliseraient l'effet tunnel, soit la capacité d'une particule de franchir une barrière, comme le son peut traverser un mur. Par ce mécanisme d'effet tunnel, les enzymes pourraient ainsi bouger un électron ou un proton d'une partie d'une molécule à une autre. Il semble aussi que l'intrication joue un rôle dans la magnétoréception, soit la capacité d'un organisme de détecter et s'aligner sur un champ magnétique. Comme le feraient notamment les rouges-gorges avec le champ magnétique terrestre. Le sujet est notamment abordé dans le livre *Life on the Edge* de Jim Al-Khalili et Johnjoe McFadden.

[p. 136] « En théorie, tout est intricable... » — « La connexion quantique peut, en principe au moins, s'étendre au-delà du microscopique au macroscopique », écrivent Bruce Rosenblum et Fred Kuttner (*op. cit.* p. 188).

[p. 139] Carlo Rovelli, *Par-delà le visible, la réalité du monde physique et la gravité quantique*, éd. Odile Jacob Sciences, 2015, Paris, p. 119.

[p. 140] « Ces nano-instants suffisent... » — La matière peut être définie comme « une poignée de types de particules élémentaires qui vibrent et flottent continuellement entre l'existence et la non-existence », écrit Carlo Rovelli (*Sept brèves leçons de physique*, éd. Odiles Jacob, Paris, 2015, p. 46). L'expression « vide en mouvement » est quant à elle empruntée à Marc-Antoine Matthieu, *Dieu en personne*, éd. Delcourt, 2009, p. 23.

[p. 140] « Ce vide entre en danse avec les photons... » — Les électrons avalent constamment des photons qui les font monter en haute énergie (orbites hautes), l'atome est alors dit « excité », il bouge, vibre plus vite. L'électron pourra alors servir de transporteur d'énergie, comme un véhicule à photons qu'il déposera plus loin (par exemple lors de la photosynthèse). Une fois le photon recraché, l'électron et son atome redescendent en basse énergie. « Les particules élémentaires les plus connues du champ électromagnétique, à savoir les électrons et les photons, peuvent se métamorphoser l'une en l'autre (...) La disparition du photon montre que la lumière peut être absorbée, et donc devenir, un électron. La réapparition du photon quelques instants plus tard montre, quant à elle, qu'un électron peut émettre, et donc lui aussi devenir, de la lumière », explique le physicien Christophe Galfard (*L'Univers à portée de main*, *op. cit.*, p. 272).

[p. 141] « L'Univers est un nuage flou, une onde probabiliste... » — La « théorie quantique des champs » est une extension de l'électrodynamique quantique formalisée par Richard Feynman. L'électrodynamique quantique permet connaître le comportement non pas d'une seule particule mais d'un champ de particules, en l'occurrence électromagnétique.

Les premiers calculs aboutirent à des résultats infinis. Or s'il y a une chose que les scientifiques détestent, avec les coïncidences inexplicables, ce sont les infinis, ces aberrations mathématiques que nous avons vues plusieurs fois (voir notes p. 26 sur la division par zéro ou le trou noir p. 58).

Pour éliminer les résultats infinis dans les équations quantiques, Feynman fit abstraction de la gravité et utilisa une astuce classique en incorporant des infinis négatifs dans les équations, permettant de redonner des valeurs « normales » aux résultats. Cette technique est justement appelée « renormalisation ». La théorie quantique des champs a ensuite été élargie à n'importe quel champ quantique, soit le champ des interactions nucléaires faibles et le champ des interactions nucléaires fortes (voir aussi note p. 90).

Reste un problème : la gravité n'est pas en prise en compte dans les calculs des champs quantiques. Feynman, puis d'autres, ont bien tenté de faire entrer la gravité et la relativité générale dans le giron de la physique quantique. Feynman suivit la démarche déjà utilisée pour élaborer son électrodynamique quantique en remplaçant le photon par une particule hypothétique : le « graviton ». Exactement comme le photon est le messager de la force électromagnétique, le graviton permettrait de transmettre l'interaction existant entre deux masses. Feynman se heurta à nouveau au problème des résultats tendant vers l'infini. Il retenta la pirouette mathématique des « infinis négatifs », sans succès cette fois. Impossible notamment de se débarrasser de la gravité dans les calculs, puisque les supposés gravitons *sont* la gravité. Le problème de la quantification de la gravité n'est aujourd'hui toujours pas résolu. Des théories s'y attellent comme la théorie de la gravité quantique à boucles. Mais pour le moment le « graviton » demeure insaisissable.

(Réf princ. : Guy Louis-Gavet, *op. cit.* p. 140-142/Christophe Galfard, *op. cit.*, p. 421 à 425)

[p. 141] « Le monde existe-t-il car il est observé ? » — En 1953, deux ans avant sa mort, Einstein s'entretint chez lui - 112 Mercer Street, Princeton - avec un petit groupe d'étudiants de John Wheeler. Einstein tourna à nouveau en dérision l'idée de l'observateur créateur : « Quand une souris observe l'univers, cela change-t-il l'état de l'univers ? » Pour lui, la réponse était évidemment non.

Mais les expériences quantiques, dont celles imaginées par Wheeler justement (revoir l'expérience du choix retardé p. 107) semblent dire autre chose : elles montrent un Univers dans un état flou et probabiliste d'information potentielle que « l'observation » fait s'effondrer en informations et sensations réelles.

Pour Stephen Hawking et Leonard Mlodinow, l'Univers lui-même n'a pas *une* histoire définie, une histoire « bottom-up » (ascendante) comme ils l'appellent, mais bien « top-down » (descendante).

Explication : l'Univers du Big Bang est né de l'infiniment petit. Il serait ainsi de nature quantique et répondrait à la nature probabiliste de « la somme sur tous les chemins » de Feynman (voir p. 95). « Nous créons une histoire par notre observation, plutôt que l'histoire nous crée. Nous devrions voir les histoires « descendante » [*from the top down*] en revenant en arrière depuis le présent (...). Certaines histoires seront plus probables que d'autres, et la somme sera normalement dominée par une seule histoire qui commence avec la création de l'univers et culmine dans l'état en considération. Mais il y aura différentes histoires pour différents états possibles de l'univers au temps présent. Les histoires (...) dépendent de ce qui a été mesuré (...) Il peut y avoir une histoire où la lune est faite de Roquefort (...) Si les histoires dans lesquelles la lune est faite de fromage ne contribuent pas à l'état présent de notre univers, elles pourraient contribuer à d'autres. Cela sonne comme de la science-fiction, mais cela n'en est pas. »

(Réf. princ. : Walter Isaacson, *Einstein : His Life and Universe*, ed. Simon & Schuster, 2008, p. 515/Robert. Lanza, *op. cit.* p. 146/Stephen Hawking et Leonard Mlodinow, *The Grand Design*, *op. cit.* p. 178-179)

[p. 142] « Mais le soleil émet à d'autres longueurs d'onde... » — Les autres ondes électromagnétiques diffèrent de la lumière visible par un *seul* aspect : leur longueur. Les ondes radio ont une longueur d'onde d'un mètre ou plus. La lumière visible de quelques millièmes de mètres. Les rayons X encore moins. « Ce n'est probablement pas un accident que les longueurs d'onde que nous pouvons voir à l'œil nu sont celles dans lesquelles le soleil irradie le plus fort : il est probable que nos yeux évoluèrent avec la capacité de détecter la radiation électromagnétique précisément dans cette gamme parce que c'est la gamme de radiation la plus disponible pour eux. » (Hawking-Mlodinow, *ibid.* p. 117-118)

[p. 142] « Tu pourrais voir un autre moi ! » — Hilbert ressemblerait au dessin en page 142 si nous percevions les rayons X ou gamma, très énergétiques. Nous verrions aussi de puissantes billes d'énergie venant par exemple de supernovæ, le ciel aurait une activité frénétique. Le rayonnement visible lui-même est un grand illusionniste. Lorsque notre lumière visible (celle de l'arc-en-ciel) percute une tomate par exemple, les rayons rouges rebondissent au lieu d'être absorbés (ils sont inutiles pour elle). Voilà l'unique raison pour laquelle une tomate nous apparaît rouge. Idem pour le rayonnement vert sur les feuilles. « Ce que nous « voyons » ce n'est jamais rien d'autre que le champ électromagnétique. Quand nous regardons quelque chose, ce n'est pas à l'objet que nous sommes directement sensibles, mais aux oscillations du champ électromagnétique entre lui et nous : à la lumière réfléchie par l'objet. Pensez à ce que vous voyez dans un miroir, ou sur un écran de cinéma ou dans un hologramme. Dans ces trois cas, il n'y a pas d'objet à l'endroit où vous croyez en voir un, mais seulement de la lumière renvoyée comme si l'objet était là. L'effet est le même », écrit Carlo Rovelli.

« Si les électrons et les photons ne pouvaient se transformer les uns en les autres, nous ne verrions pas la tomate, ni la personne en face de nous, ni quoi que ce soit », ajoute Christophe Galfard. « Plus incroyable encore, nos corps, par l'intermédiaire de nos sens, transforment toutes ces interactions étranges en informations traitées par nos cerveaux. »

(Réf. princ. : Nasa.gov, art. « Mysterious Object at the Edge of the Electromagnetic Spectrum »/ C. Rovelli, *Et si le temps n'existait pas*, *op. cit.* p. 12 / Christophe Galfard, *op.cit.*, p. 274)

[p. 143] Dialogues de la page inspirés de Carlo Rovelli, *op. cit.* pp. 121-124

[p. 143] « Un caillou est un processus monotone. » — C. Rovelli cite ici le philosophe Nelson Goodman. (*ibid.* p. 124.)

[p. 145] « ... même des objets visibles à l'œil nu... » — Le terme « macroscopique » n'est pas qu'une vue de l'esprit. En 2011, une équipe de l'Université d'Oxford en Grande-Bretagne a intriqué deux cristaux de diamant visibles à l'œil nu : « Une paire de cristaux de diamant ont été reliés par intrication quantique. Cela signifie qu'une vibration sur l'un des cristaux ne pouvait être attribuée de manière significative à l'un ou l'autre : les deux cristaux vibraient ou ne vibraient pas simultanément. »

L'intrication et la superposition au niveau macroscopique sont d'ailleurs aujourd'hui un des principaux domaines de la recherche quantique : « Nous espérons intriquer des objets toujours plus larges dans les années à venir », expliquait Nicolas Gisin en 2013. Son équipe de chercheurs de l'Université de Genève a justement franchi un nouveau cap en octobre 2017 : elle a réussi à prouver l'intrication de 16 millions d'atomes au sein d'un cristal d'un centimètre de côté. Cette performance bat le record de 3 000 atomes réalisé deux ans plus tôt par une équipe du Massachusetts Institute of Technology (MIT) de Boston et de l'Université de Belgrade dirigée par Vladan Vuletic.

(Réf. : « Entangled diamonds vibrate together », magazine Nature, 1^{er} décembre 2011/Université de Genève, communiqués de presse, 12 oct. 2017 et 25 juillet 2013/article « Entanglement with negative Wigner function of almost 3 000 atoms heralded by one photon », magazine Nature, 25 mars 2015.)

[p. 145] « Des expériences quantiques ont été menées... » — Des effets quantiques ont aussi été observés « dans des systèmes larges, humides et bruyants. C'est ce qui est surprenant et excitant », s'enthousiasme le physicien Yasser Omar, coordinateur du projet européen PAPETS (Phonon-Assisted Processes for Energy Transfer and Sensing) dont la mission est justement d'explorer la frontière entre biologie et physique quantique.

(Réf. : site projet européen www.papets.eu/article « Quantum physics provides startling insights into biological processes », juillet 2015, site phys.org)

[p. 146] « Au cours du siècle dernier, la science... » — L'expression « réel voilé » est de Bernard d'Espagnat, l'un des premiers physiciens français auteur d'ouvrage de vulgarisation en matière de physique quantique. Le « réel voilé » désigne le fait qu'il semble impossible d'éviter l'observateur humain quand on veut décrire les fondements de la matière : « Voilà pourquoi l'on n'a pas accès au réel « en soi », lorsqu'on effectue une démarche scientifique, mais au « réel empirique », voilà pourquoi le réel véritable est au-delà de la physique, au-delà des perceptions que nous pouvons avoir, au-delà des mesures que nous pouvons faire avec les instruments les plus perfectionnés existants ou pouvant être réalisés dans le futur. »

(Réf. : entretien « À la recherche du réel », réalisé par Jean Staune, site de l'Université interdisciplinaire de Paris. Voir également : Bernard d'Espagnat, *À la recherche du réel*, Bordas, Paris, 1979.)

[p. 148] « Ce que l'être humain... » — Pour le philosophe Michel Bitbol, la mécanique quantique nous fait changer notre vision de l'être, « changer d'ontologie. » (*Mécanique quantique, une introduction philosophique*, p. 365)

[p. 149] « Pour surmonter cette contradiction... » — La théorie des supercordes est défendue notamment par Brian Greene et Leonard Susskind. Elle postule l'existence de 10 dimensions spatiales, mais aussi de particules dites « supersymétriques » : à chaque boson (autrement dit les particules d'énergie, par ex. le photon) répondrait un « superpartenaire » caché, un fermion (soit les particules de matière, par ex. un électron). Les différentes versions de la théorie des supercordes sont regroupées sous l'appellation « théorie M » (personne n'a l'air de savoir d'où a bien pu sortir ce « M »). La théorie M envisage l'existence possible de 10^{500} univers différents. Si l'on compare ce chiffre au déjà renversant 10^{80} particules composant notre univers, on a une idée de la phénoménale, invraisemblable grandeur d'un 10 suivi de 500 zéros ! Très populaire dans les années 90, la théorie des supercordes est en perte de vitesse, aucune confirmation expérimentale n'ayant étayé ses hypothèses. En 2012, lors de la découverte du boson de Higgs, on pensait mettre la main sur ces supposées particules supersymétriques, il n'en fut rien.

La théorie de la gravité quantique à boucles est la plus sérieuse concurrente de la théorie des supercordes. Elle essaie de son côté de « quantifier » la gravité, dernière des quatre forces de l'univers à échapper encore aux lois quantiques. « De quoi le monde est-il fait ? La réponse est simple : les particules sont des quanta de champs quantiques ; la lumière est formée des quanta d'un champ, l'espace n'est qu'un champ, lui aussi quantique ; et le temps naît à partir des processus de ce même champ. Autrement dit, le monde est entièrement fait de champ quantique », écrit Carlo Rovelli, cofondateur de la théorie. L'espace ne pourrait être réduit à une taille infiniment petite, mais serait composé de grains (des sortes de pixels) d'une taille minimale au-dessous de laquelle on ne pourrait aller. Le chercheur estime en outre que la gravité quantique à boucles éliminerait les infinis sur lesquels tombent les physiciens mathématiciens, notamment l'infini de la courbure spatio-temporelle dans les trous noirs. La théorie de la gravité quantique à boucles est, elle aussi, en quête de preuves confirmant son approche théorique.

(Réf. princ. : S. Hawking, L. Mlodinow, *op. cit.* p. 149-152/ C. Rovelli, *op. cit.* p. 176-177 / B. Cox, J. Forshaw, *op. cit.* p. 6)

[p. 150] « ... dans le décor d'une autre réalité, une réalité ultime. » — « On est conduit à se demander si nous ne tentons pas d'appliquer les notions d'« espace » et de « temps » à une réalité ultime qui les ignore. », écrivent Sven Ortoli et Jean-Pierre Pharabod (*op. cit.* p. 110) Robert Lanza écrit de son côté : « Un autre royaume semble imprégner la réalité - un royaume en dehors de l'espace-temps dans lequel les planètes orbitent autour des étoiles. » (*op.cit*, p. 73)

[p. 150] « ... d'une sorte de pudding en gelée. » — Pour illustrer sa théorie de la relativité gravitationnelle, Albert Einstein parlait d'un gigantesque « mollusque » de référence. Le « pudding » relève de la même idée.

[p. 151] « Et avant le big bang, y avait-il autre chose ?... » — Les questions croisent ici plusieurs hypothèses en vogue. Celle d'une non-existence du temps avant le big bang : comme espace et temps sont imbriqués, si l'espace n'existait pas, alors le temps ne devait pas exister non plus. Des théories émettent l'hypothèse d'un (ou même plusieurs) big crush, inverse du big bang. Des univers se contracteraient ainsi avant de se redéployer, de « rebondir ». La théorie des supercordes suppose, on l'a vu, l'existence de dimensions additionnelles. Quant à la théorie de la gravité quantique à boucle, elle soupçonne plutôt que « l'espace et le temps sont des approximations qui n'apparaissent qu'à grande échelle ». L'Univers quantique figé par le hasard est une thèse défendue notamment par S. Hawking et L. Mlodinow : nous détaillons son principe en note p. 141.

Certains vont même jusqu'à dire que nous vivons dans une matrice virtuelle (oui, comme dans le film *Matrix*), une sorte de jeu vidéo créé par une intelligence supérieure. En d'autres temps, on aurait appelé ça une religion, là c'est une « simulation holographique ». Cette idée a gagné en popularité depuis qu'Elon Musk, patron de Tesla, a déclaré y adhérer. La thèse est défendue par quelques rares scientifiques, dont Rich Terrile, du Jet Propulsion Laboratory de la Nasa. Max Tegmark, professeur de physique au MIT de Boston réagit à cette idée dans le journal *The Guardian* : « Est-il possible logiquement que nous soyons dans une simulation ? Oui. Sommes-nous probablement dans une simulation ? Non. » « Il n'y a aucune preuve tangible », surenchérit la physicienne théoricienne Lisa Randall qui conclut avec cet argument, peut-être le plus pertinent : « Il y a beaucoup de prétention à penser que nous serions la finalité d'une simulation. »

(Réf. princ. : Guy Louis-Gavet, *op. cit.*, p. 152/C. Rovelli, *op. cit.* p. 136 et 178 / John D. Barrow, *Une brève histoire de l'infini*, Robert Laffont, Paris, 2008, p. 110/*The Guardian*, « Is our world a simulation ? Why some scientists say it's more likely than not », 11 oct. 2016).

[p. 151] « ... celle qui nous parvient du fond de l'Univers n'a pas subi les outrages du temps... » — Christophe Galfard, *E = mc², l'équation de tous les possibles*, *op. cit.* p. 88-89.