

LEONARD SUSSKIND

TROUS NOIRS

LA GUERRE DES SAVANTS

ROBERT LAFFONT

Facebook : La culture ne s'hérite pas elle se conquiert

TROUS NOIRS

DU MÊME AUTEUR

Chez le même éditeur

Le Paysage cosmique, 2007

LEONARD SUSSKIND

TROUS NOIRS

La guerre des savants

traduit de l'anglais (États-Unis) par Jules Bambaggi



ROBERT LAFFONT

Ouvrage publié avec le concours
du Ministère de la Culture et de la Communication
(Centre national du livre et Cité des sciences et de l'industrie)
dans le cadre du Fonds Jules Verne

Titre original : THE BLACK HOLE WAR

© Leonard Susskind, 2008

Traduction française : Éditions Robert Laffont, S.A., Paris, 2010

ISBN 978-2-221-10671-6

(édition originale : ISBN 978-0-316-01640-7 Little, Brown and Company, New York)

*Qu'est-ce qui insuffle le feu dans les équations
et leur fournit un univers à décrire ?*

STEPHEN HAWKING

Introduction

Il y avait tant à gnoquer et si peu à gnoquer de lui.

ROBERT A. HEINLEIN, *En terre étrangère*¹

Quelque part dans la savane de l'Est africain, une lionne vieillissante aperçoit le repas qu'elle convoite. À cette jeune antilope pleine d'allant, elle préférerait une prise plus âgée et plus lente, mais elle n'a pas le choix. Les yeux méfiants de la proie se trouvent sur les côtés de sa tête, ce qui convient à merveille pour scruter le paysage et repérer les dangereux prédateurs. Ceux de la lionne regardent droit devant, parfaits pour river le regard sur la victime et évaluer la distance.

Cette fois, le prédateur a échappé au regard panoramique de l'antilope qui gambade à sa portée. Les puissantes pattes arrière de la lionne la propulsent sur sa victime en pleine panique. Et c'est à nouveau l'éternelle poursuite...

Malgré son âge, le grand félin est meilleur coureur. Au début, l'écart se réduit ; mais les contractions puissantes et rapides des muscles de la lionne finissent par provoquer un manque d'oxygène. Bientôt, l'endurance naturelle de l'antilope triomphe ; le moment

1. *Stranger in a Strange Land*, publié pour la première fois aux États-Unis en 1961, a été un best-seller dès sa sortie et est paru en 1970 en traduction française sous le titre *En terre étrangère* (Robert Laffont, 1999, collection *Ailleurs & Demain*). Dans ce livre, dont le héros est un homme élevé par des Martiens et qui essaye de vivre sur Terre, Heinlein a créé un néologisme pour un concept martien, *To grok* : passée dans le vocabulaire de la science-fiction, cette expression est aujourd'hui présente dans l'Oxford English Dictionary et signifie comprendre profondément quelqu'un, l'observateur fusionnant en quelque sorte avec l'observé. C'est ce néologisme qui a été traduit par le verbe « gnoquer », sur la racine du grec *gnosis*, la connaissance. (N.d.T.)

arrive où la vitesse relative du félin et de sa proie change de signe : l'écart se creuse. Dès lors qu'elle se rend compte de ce renversement des chances, Son Altesse royale a perdu : elle s'éclipse dans les broussailles.

Il y a cinquante mille ans, un chasseur fatigué repère une entrée de grotte obstruée par un rocher : cela constituerait un abri sûr s'il parvenait à déplacer le lourd obstacle. À la différence de ses ancêtres simiesques, le chasseur se tient debout. Dans cette position bien droite, il pousse vigoureusement sur le rocher mais rien ne se passe. Pour obtenir un meilleur angle, il écarte ses pieds du rocher. Quand son corps est presque à l'horizontale, il exerce sur le rocher une force dont la composante dans la bonne direction est bien plus grande : le rocher s'écarte.

Distance, vitesse, changement de signe, angle, force, composante ? Quels calculs d'une incroyable sophistication ont-ils bien pu se dérouler dans le cerveau sans instruction du chasseur, sans même parler de celui du félin ? Il s'agit là de concepts techniques dont on ne fait généralement connaissance que dans les manuels de physique de l'enseignement secondaire. Où donc notre félin a-t-il appris à estimer non seulement la vitesse de sa proie mais aussi, plus important, sa vitesse relative ? Le chasseur a-t-il appris le concept de force en suivant un cours de physique ? Ainsi que de trigonométrie pour évaluer sinus et cosinus afin d'en calculer les composantes ?

En réalité, toutes les formes complexes de vie possèdent bien entendu des concepts de physique innés, instinctifs, qui ont été « implémentés » dans leur système nerveux par l'évolution¹. Sans un tel logiciel de physique préprogrammé, survivre serait impossible. Les mutations et la sélection naturelle ont fait de nous tous des physiciens, et c'est vrai aussi des animaux. Chez les humains, la grande taille du cerveau a permis que ces instincts évoluent en concepts que nous hissons au niveau de la conscience.

1. Personne ne sait, en réalité, ce qui est inné et ce qui est acquis dans les premières années de la vie, mais la distinction n'a ici guère d'importance. Ce qui compte c'est qu'une fois nos systèmes nerveux parvenus à une certaine maturité, l'expérience – qu'elle provienne d'une acquisition personnelle ou de l'évolution – nous dote d'une grande connaissance instinctive du comportement du monde physique. Qu'elle soit innée ou acquise dans les jeunes années, il est très difficile de désapprendre cette connaissance.

Nous reprogrammer

En fait, nous sommes tous des physiciens classiques¹. C'est dans les tripes que nous ressentons forces, vitesse et accélération. Dans la nouvelle de science-fiction *En terre étrangère* (1961), Robert Heinlein a créé un mot pour exprimer cette sorte de compréhension profondément intuitive, presque viscérale, d'un phénomène : gnoquer. Je gnoque les forces, la vitesse et l'accélération. Je gnoque le temps qui passe et le nombre 5 .

La trajectoire d'une pierre ou d'une lance est gnoquable. Mais le gnoque d'origine de série installé en moi tombe en panne quand je lui demande d'appréhender un espace-temps à dix dimensions, le nombre 101 000 ou bien, pis encore, le monde des électrons ou le principe d'incertitude de Heisenberg.

À l'orée du xx^e siècle, les pannes de l'intuition se sont produites en masse : la physique s'est retrouvée brusquement toute tourneboulée par des phénomènes étranges. Mon grand-père paternel avait déjà dix ans quand Albert Michelson et Edward Morley ont découvert que le mouvement orbital de la Terre à travers l'hypothétique éther ne pouvait pas être détecté². Jusqu'à ses vingt ans, on ne savait rien des électrons. Il avait trente ans l'année où Albert Einstein publia sa théorie de la relativité restreinte et cinquante quand Heisenberg découvrit le principe d'incertitude. La pression de l'évolution n'avait aucune chance de donner naissance à une compréhension intuitive de ces mondes radicalement différents. Mais quelque chose dans notre réseau neuronal, au moins celui de certains d'entre nous, a amorcé une reprogrammation inouïe permettant non seulement de s'interroger sur ces phénomènes obscurs mais aussi de créer les abstractions mathématiques – de nouveaux concepts résolument non intuitifs – afin de les manier et de les expliquer.

C'est la vitesse qui a été la cause première de ce besoin de reprogrammation – une vitesse si grande qu'elle rivalise presque avec celle d'un faisceau fugitif de lumière. Aucun animal ne s'était

1. Le mot *classique* renvoie à la physique pour laquelle les considérations de la mécanique quantique ne sont pas nécessaires.

2. La célèbre expérience de Michelson et Morley a montré pour la première fois que la vitesse de la lumière est indépendante du mouvement de la Terre. Cela fit naître des paradoxes qu'Einstein a fini par résoudre dans sa théorie de la relativité restreinte.

jamais déplacé à plus de 200 kilomètres à l'heure avant le xx^e siècle. La lumière va si vite que, même aujourd'hui, en dehors de considérations scientifiques, il n'y a aucun déplacement : elle se contente d'apparaître instantanément quand on appuie sur l'interrupteur. Les êtres humains d'antan n'avaient nul besoin de circuits neuronaux adaptés à des vitesses aussi élevées que celle de la lumière.

À cause de la vitesse, il a d'un seul coup fallu refaire tout le programme... Einstein n'était cependant pas un mutant : il avait dû se battre dans l'ombre pendant une décennie pour remplacer ses vieux circuits newtoniens. Mais les physiciens de son temps ont dû voir en lui une nouvelle sorte d'être humain spontanément apparu au milieu d'eux : quelqu'un qui pouvait voir le monde non pas en trois dimensions mais dans les quatre dimensions de l'espace-temps.

Einstein s'est battu pendant une autre décennie – cette fois au vu de tous les physiciens – afin d'unifier ce qu'il avait appelé relativité restreinte avec la théorie newtonienne de la gravitation. Il en est ressorti la théorie de la relativité générale qui a bouleversé les idées traditionnelles en géométrie. L'espace-temps est devenu flexible, incurvé ou tordu. Il s'est mis à réagir à la présence de matière pratiquement comme un morceau de caoutchouc tendu. Jusque-là, il était passif avec des propriétés géométriques invariantes. Avec la relativité générale, il est devenu acteur et pouvait être déformé par la présence d'objets massifs, telles les planètes et les étoiles, mais ne pouvait pas être visualisé – en tout cas pas sans un bon paquet de mathématiques supplémentaires.

En 1900, cinq ans avant qu'Einstein n'entre en scène, un autre changement, encore plus radical, eut lieu avec la découverte du fait que la lumière était composée de particules appelées photons¹, ou parfois quanta de lumière. Cette théorie de la lumière n'était qu'un signe avant-coureur de la révolution à venir qui allait nécessiter une gymnastique cérébrale bien plus abstraite que tout ce qu'on avait pu connaître jusque-là. La mécanique quantique représentait plus qu'une nouvelle loi de la nature : elle supposait changer les règles de la logique classique, les façons ordinaires de penser que toute personne saine d'esprit utilise dans ses déductions. Tout cela semblait complètement fou. Mais, fou ou non, les physiciens se

1. Le terme *photon* a été inventé en 1926 par le chimiste Gilbert Lewis.

sont montrés capables de se reprogrammer à partir d'une nouvelle logique, la logique quantique. J'expliquerai au chapitre 4 tout ce dont vous aurez besoin d'en connaître. Attendez-vous à être bluffés ! Tout le monde l'est...

Dès le début, relativité et mécanique quantique n'ont pas fait bon ménage. De leur mariage forcé a tout de suite jailli la violence – les mathématiques faisant furieusement apparaître l'infini sitôt qu'un physicien se posait une question. Il a fallu un demi-siècle pour réconcilier mécanique quantique et relativité restreinte mais on a fini par éliminer les contradictions mathématiques. Au début des années 1950, Richard Feynman, Julian Schwinger, Sin-Itiro Tomonaga et Freeman Dyson¹ ont posé les bases d'une synthèse de la relativité *restreinte* et de la mécanique quantique : la théorie quantique des champs. Mais relativité *générale* (la synthèse réalisée par Einstein entre la relativité restreinte et la théorie newtonienne de la gravitation) et mécanique quantique sont restées inconciliables, et ce ne fut pas faute d'avoir tenté de les réconcilier ! Feynman, Steven Weinberg, Bryce DeWitt et John Wheeler se sont tous essayés à « quantifier » les équations d'Einstein de la gravitation mais il n'en est ressorti qu'une infâme bouillie mathématique. Il n'y avait sans doute là rien de surprenant. La mécanique quantique s'occupait d'objets très légers. À l'opposé, la gravitation n'avait l'air de jouer que pour des blocs de matière très lourds. Il paraissait raisonnable de penser que rien ne pouvait être à la fois suffisamment léger pour que la mécanique quantique entre en scène et suffisamment lourd pour nécessiter l'intervention de la gravitation. De là le fait que de nombreux physiciens de la seconde moitié du xx^e siècle ont considéré que la quête d'une telle théorie unificatrice était vaine, réservée aux cinglés ou aux philosophes.

Mais, pour d'autres physiciens, cette façon de voir paraissait à courte vue. Aux yeux de ceux-là, l'idée même de deux théories de la nature incompatibles – et même contradictoires – était intellectuellement inacceptable. Ils pensaient que la gravitation jouait presque à coup sûr un rôle pour déterminer les propriétés des plus petits blocs constitutifs de matière, le problème venant de ce que les physiciens n'avaient pas fouillé assez profondément. En fait, c'est eux qui avaient raison : tout en bas des fondations du monde,

1. En 1965, Feynman, Schwinger et Tomonaga ont reçu le prix Nobel pour ce travail. Mais l'approche moderne de la théorie quantique des champs doit autant à Dyson qu'à eux.

là où les distances sont bien trop petites pour être observées directement, il y a de puissantes interactions gravitationnelles entre les plus petits objets de la nature.

De nos jours, il est largement admis qu'interactions gravitationnelles et mécanique quantique font jeu égal pour établir les lois qui gouvernent les particules élémentaires. Mais la taille des blocs de base constitutifs de la nature est d'une petitesse à ce point inconcevable que personne ne doit être surpris qu'il faille tout remettre à plat de façon radicale pour les appréhender. Le résultat, quel qu'il soit, s'appellera *gravité quantique* ; même sans en connaître la forme détaillée, on peut raisonnablement dire que le nouveau paradigme supposera des concepts tout à fait étranges de temps et d'espace. La réalité objective des points de l'espace et des instants du temps est sur le départ, suivant en cela le chemin de la simultanéité¹, du déterminisme² et de toutes les scories du passé. La gravité quantique décrit une réalité bien plus subjective que nous ne l'avons jamais imaginé. Comme nous le verrons au chapitre 18, il s'agit d'une réalité qui s'apparente de bien des façons à l'illusion tridimensionnelle fantomatique projetée par un hologramme.

Les physiciens théoriciens se battent pour prendre pied sur une terre étrange. Comme par le passé, des expériences de pensée ont conduit à de légers paradoxes et à des conflits entre principes fondamentaux. Ce livre est consacré à une bataille intellectuelle à propos d'une seule expérience de pensée. En 1976, Stephen Hawking a imaginé lancer une séquence d'informations (un bit) à l'intérieur d'un trou noir – un livre, un ordinateur ou même une particule élémentaire. Hawking pensait que les trous noirs étaient les trappes ultimes et que la séquence d'informations serait irrémédiablement perdue pour le monde extérieur. Cette observation, apparemment anodine, était loin de l'être : elle menaçait de saper et de faire basculer tout l'édifice de la physique moderne. Quelque chose ne tournait vraiment pas rond : la plus fondamentale des lois de la nature – la conservation de l'information – était sérieusement menacée. Pour ceux qui y avaient pris garde, ou bien Hawking se trompait ou bien le pilier tricentenaire de la physique ne tenait plus bon.

1. Une des premières choses à avoir disparu avec la révolution relativiste de 1905 a été l'idée que deux événements pouvaient être objectivement simultanés.

2. Le déterminisme est le principe qui pose que le futur est complètement déterminé par le passé. D'après la mécanique quantique, les lois de la physique sont statistiques et rien ne peut être prédit avec certitude.

Au début, très peu y avaient prêté attention. Pendant presque deux décennies, la controverse est largement passée inaperçue. Le grand physicien hollandais Gerard 't Hooft et moi-même formions une armée de deux personnes d'un côté du fossé intellectuel tandis que Stephen Hawking et une petite troupe de relativistes se tenaient de l'autre. Ce ne fut pas avant le début des années 1990 que la plupart des physiciens théoriciens – particulièrement les théoriciens des cordes – prirent conscience de la menace que Hawking avait fait peser, et encore comprirent-ils de travers. Pour un temps du moins.

La guerre du trou noir a été une authentique controverse scientifique – rien à voir avec les pseudo-débats sur le dessein intelligent ou le réchauffement climatique. Ces querelles bidon, concoctées par des politiciens manipulateurs pour embrouiller un public naïf, ne traduisent aucune différence réelle du point de vue scientifique. À l'opposé, le schisme à propos des trous noirs était bien réel. D'éminents théoriciens de la physique ne parvenaient pas à s'entendre sur les principes auxquels on pouvait se fier et sur ceux qu'il convenait d'abandonner. Devaient-ils suivre Hawking et ses vues conformistes sur l'espace-temps, ou 't Hooft et moi-même, avec nos vues conformistes sur la mécanique quantique ? Chaque façon de voir semblait ne mener que de paradoxe en contradiction. Ou bien l'espace-temps – la scène sur laquelle se jouent les lois de la nature – n'était pas ce que nous pensions qu'il était, ou bien les vénérables principes d'entropie et de conservation de l'information étaient faux. Des millions d'années d'évolution de la connaissance et l'expérience de deux siècles de physique nous avaient une nouvelle fois dupés et nous obligeaient à entièrement nous reprogrammer.

Trous noirs, la guerre des savants est un ouvrage en l'honneur de l'esprit humain et de son aptitude remarquable à découvrir les lois de la nature. Il s'agit d'une explication du monde bien plus éloignée de nos sens que la mécanique quantique et la relativité. La gravité quantique met en jeu des objets cent milliards de milliards de fois plus petits qu'un proton. Nous n'avons jamais réalisé d'expérience directe sur des objets aussi petits et ne le ferons probablement jamais ; mais l'ingéniosité humaine nous a permis de déduire leur existence et, contre toute attente, les portes qui ouvrent sur ce monde sont des objets d'une masse et d'une taille gigantesques : les trous noirs.

Trous noirs, la guerre des savants est aussi la chronique d'une découverte. Le principe holographique est une des abstractions les moins intuitives de toute la physique. Cela a été le point culminant de plus de deux décennies de bataille intellectuelle sur le devenir de l'information qui tombe dans un trou noir. Il ne s'agissait pas d'une guerre entre ennemis jurés : en fait, les principaux protagonistes sont des bons amis. Mais c'était un féroce combat d'idées entre gens qui se respectaient profondément mais étaient foncièrement en désaccord.

Il est une opinion largement répandue qui doit être démentie. L'image que le public a des physiciens, particulièrement des physiciens théoriciens, est très souvent celle de gens ringards, à la mentalité étriquée, dont les centres d'intérêt sont étrangers, non humains, assommants. Rien ne saurait être plus éloigné de la vérité. Les grands physiciens que j'ai connus, et j'en ai connu beaucoup, sont des gens possédant un grand charisme, animés de puissantes passions et dotés d'un esprit fascinant. La diversité de leurs personnalités et de leurs façons de penser est à mes yeux un sujet d'un intérêt inépuisable. Écrire sur la physique pour un large public sans parler de l'élément humain me paraît laisser de côté quelque chose d'important. En écrivant ce livre, j'ai tenté de rendre un peu de l'aspect émotionnel de cette histoire en même temps que son aspect scientifique.

Quelques remarques à propos des nombres très grands ou très petits

Tout au long de ce livre, vous rencontrerez foule de nombres très grands ou très petits. Le cerveau humain n'a pas été bâti pour visualiser des nombres beaucoup plus grands que 100 ou beaucoup plus petits que $1/100$; cela dit, nous pouvons toujours nous entraîner pour faire mieux. Par exemple, une grande familiarité avec les nombres peut me permettre de me représenter plus ou moins un million ; mais la différence entre mille milliards et un million de milliards est au-delà de mes possibilités de figuration. Bien des nombres qu'on trouvera dans ce livre sont bien au-delà de ces derniers. Comment les appréhender ? La réponse met en jeu une des plus importantes reprogrammations de tous les temps : l'invention des *exposants* et de la *notation scientifique*.

Commençons par un nombre raisonnablement grand. La population de la Terre est, approximativement, de 7 milliards d'êtres

humains. Un milliard, c'est 10 multiplié par lui-même neuf fois. On peut aussi le représenter par neuf zéros.

$$\text{Un milliard} = 10 \times 10 = 1\,000\,000\,000$$

Un raccourci pour écrire 10 multiplié par lui-même neuf fois est 10^9 , ou *dix puissance neuf*. De cette façon, la population de la Terre est approximativement fournie par l'égalité :

$$\text{Sept milliards} = 7 \times 10^9$$

Dans cette situation, 9 est appelé l'exposant.

Voici un nombre beaucoup plus grand : le nombre total de protons et de neutrons sur Terre.

$$\text{Nombre de protons et de neutrons sur Terre (approximativement)} = 5 \times 10^{51}$$

C'est évidemment beaucoup plus grand que la population de la Terre. Combien de fois plus grand ? Dix puissance cinquante-et-un a 51 fois dix en facteur quand un milliard ne l'a que 9 fois. 10^{51} a donc 42 facteurs 10 de plus que 10^9 . Cela fait que le nombre de nucléons présents sur Terre est 10^{42} fois plus grand que la population terrestre. (Remarquez que je n'ai pas tenu compte des coefficients multiplicateurs 5 et 7 dans les égalités précédentes. 5 et 7 ne sont pas très différents l'un de l'autre et, si l'on cherche seulement un ordre de grandeur, on peut les ignorer.)

Prenons deux nombres vraiment grands. Le nombre total d'électrons de la portion d'univers que nous pouvons voir avec les télescopes les plus puissants est d'environ 10^{80} . Le nombre total de photons¹ est d'environ 10^{90} , ce qui peut vous paraître pas beaucoup plus grand que 10^{80} , mais c'est trompeur : 10^{90} est 10^{10} fois plus grand, et 10 000 000 000 est un très grand nombre. En fait, 10^{80} et 10^{81} semblent être presque pareils, mais le second nombre est dix fois plus grand que le premier. Ainsi, un changement minime dans l'exposant peut représenter un changement énorme du nombre représenté.

Considérons maintenant des nombres très petits. La taille d'un atome est d'environ un dix-milliardième de mètre. En notations décimales :

$$\text{Taille d'un atome} = 0,000\,000\,000\,1 \text{ mètre}$$

1. Ne confondez pas photons et protons. Les *photons* sont les particules de la lumière. Les *protons* forment avec les neutrons les noyaux atomiques.

Remarquez que le 1 apparaît à la dixième décimale. La notation scientifique pour un dix-milliardième met en jeu une puissance négative, précisément -10 .

$$0,000\ 000\ 000\ 1 = 10^{-10}$$

Les nombres dotés d'un exposant négatif sont petits, tandis que ceux qui ont un exposant positif sont grands.

Essayons un autre nombre petit. Les particules élémentaires, comme les électrons, sont très légères comparées aux objets ordinaires. Un kilogramme est la masse d'un litre d'eau. La masse d'un électron est immensément plus petite. En fait, la masse d'un seul électron est d'environ 9×10^{-31} kilogramme.

En fin de compte, multiplier et diviser est très simple avec les notations scientifiques. Tout ce que vous avez à faire c'est d'additionner ou de soustraire les exposants. Voici quelques exemples.

$$10^{51} = 10^{42} \times 10^9$$

$$10^{81} \div 10^{80} = 10$$

$$10^{-31} \times 10^9 = 10^{-22}$$

Les exposants ne sont pas les seuls raccourcis utilisés pour désigner des nombres immensément grands. Dans certaines langues, certains ont leur propre nom. Par exemple, en anglais, un *googol* est 10^{100} (1 suivi de cent zéros) et un *googolplex* est 10^{googol} (1 suivi d'un *googol* de zéros), un nombre vertigineusement plus grand.

Munis de ces notions de base peu connues, revenons dans un monde en quelque sorte moins abstrait – précisément à San Francisco après trois années du premier mandat du président Ronald Reagan, la guerre froide est alors à son point culminant et une nouvelle guerre pointe.

Première partie

L'orage menace

*L'Histoire sera bienveillante envers moi,
car j'ai l'intention de l'écrire.*

WINSTON CHURCHILL¹

1. Les titres des première et quatrième parties de ce livre sont extraits des premier et cinquième tomes de l'histoire de la Seconde Guerre mondiale de Churchill, ses *Mémoires de guerre*.

1

Première salve

San Francisco, 1983

L'orage menaçait depuis plus de quatre-vingts ans au moment où la première escarmouche survint dans le grenier du manoir de Jack Rosenberg à San Francisco. Jack, aussi connu sous le nom de Werner Erhard, était un gourou, un vendeur hors pair, un peu arnaqueur sur les bords. Avant le tout début des années 1970, il n'était que Jack Rosenberg, vendeur d'encyclopédies. Et puis, un jour, en traversant le Golden Gate, il eut une révélation. Il allait sauver le monde et, à tout prendre, faire fortune. Il ne lui manquait plus qu'un nom plus « classe » et un nouveau boniment. Son nouveau nom serait Werner (pour Werner Heisenberg) Erhard (pour Ludwig Erhard, l'homme d'État allemand) ; quant au nouveau boniment, ce serait les Erhard Seminars Training, alias EST. Et ça a fonctionné : à défaut de sauver le monde, il a au moins fait fortune. Des milliers de personnes timides, peu sûres d'elles, ont payé plusieurs centaines de dollars chacune pour être sermonnées, harcelées et (si l'on en croit la légende) se voir interdire d'aller aux toilettes pendant les séminaires de motivation de seize heures animés par Werner ou l'un de ses nombreux disciples. Cela revenait beaucoup moins cher et était beaucoup plus rapide qu'une psychothérapie et, d'une certaine manière, c'était efficace. Le participant entraînait timide et peu sûr de soi : il ressortait apparemment sûr de lui, fort et chaleureux, exactement comme Werner. Peu importe si, parfois, il serrait la main de quelqu'un avec un air de robot maniaque. Il se sentait mieux. La « formation » a même

été le sujet d'un film très drôle, *Semi-Tough*, avec Burt Reynolds¹.

Werner était entouré de fans d'EST. *Esclaves* serait vraiment un terme trop fort. Disons bénévoles. Il y avait des chefs, passés par les EST, pour lui cuisiner ses repas, des chauffeurs pour le conduire à travers la ville et toutes sortes de serveurs pour s'occuper de son manoir. Mais, comble d'ironie, Werner était lui-même un groupie – un fan de physique.

J'aimais bien Werner. Il était vif, intéressant et drôle. Et fasciné par la physique. Il voulait y jouer un rôle et dépensait de grosses sommes d'argent pour faire venir des groupes de l'élite des physiciens théoriciens à son manoir. Quelquefois, c'étaient seulement quelques-uns de ses meilleurs copains physiciens – Sydney Coleman, David Finkelstein, Dick Feynman et moi-même – qui se retrouvaient chez lui pour des repas spectaculaires concoctés par des chefs célèbres. Mais, plus en lien avec notre sujet, Werner aimait être l'hôte de conférences d'élite. Avec une salle de séminaire fort bien équipée au grenier, un groupe de bénévoles pour satisfaire le moindre de nos caprices et San Francisco comme lieu de retrouvailles, ces mini-conférences étaient pleines d'entrain. Certains physiciens se méfiaient de Werner. Ils pensaient qu'il allait dévoyer ses liens avec le monde de la physique pour assurer sa propre promotion, mais il ne l'a jamais fait. Autant que je sache, il aimait simplement entendre les dernières idées exprimées de la bouche même de ceux qui les concevaient.

Je crois qu'il y a eu en tout trois ou quatre conférences EST, mais une seule d'entre elles a laissé une empreinte indélébile en moi, ainsi que sur mes recherches en physique. C'était en 1983. Parmi les invités, il y avait, entre autres, Murray Gell-Mann, Sheldon Glashow, Franck Wilczek, Savas Dimopoulos et Dave Finkelstein. Mais, pour l'histoire qui va être contée, les participants les plus importants étaient les trois principaux protagonistes de la guerre du trou noir : Gerard 't Hooft, Stephen Hawking et moi-même.

Je n'avais rencontré Gerard que peu de fois avant 1983, mais il m'avait fait une forte impression. Tout le monde savait qu'il était brillant, mais ce que je sentais était bien plus que cela. Il paraissait

1. Film américain de Michael Ritchie (1978), dont la version française a pour titre *Les Faux Durs*. (N.d.T.)

comme fait d'acier, avec une force intellectuelle que je n'avais rencontrée chez personne, en dehors, peut-être, de Dick Feynman. Tous deux étaient des metteurs en scène. Dick était un metteur en scène américain – impertinent, insolent, macho au possible et ne supportant pas d'être surpassé. Une fois, au milieu d'un groupe de jeunes étudiants en physique du California Institute of Technology, il raconta une blague que des étudiants diplômés avaient faite sur lui. Cela se passait dans une sandwicherie de Pasadena où étaient servis des sandwiches de « célébrités ». Vous pouviez manger un sandwich Humphrey Bogart ou Marilyn Monroe et ainsi de suite. Les étudiants l'avaient emmené là pour déjeuner – pour son anniversaire, je crois – et, l'un après l'autre, ils commandaient le sandwich Feynman. Ils s'étaient mis d'accord avec le patron à l'avance et le gars, derrière le comptoir, ne cilla pas.

Quand il eut fini son histoire, je lançai : « Ça alors, Dick, je me demande la différence qu'il y aurait entre un sandwich Feynman et un sandwich Susskind !

— Oh, ils seraient à peu près pareils, répondit-il, à ceci près que le sandwich Susskind, on n'en finirait pas de le tartiner !

— Tu parles ! Il serait surtout moins tarte ! »

Je pense que c'est la seule fois où je l'ai battu sur ce terrain¹.

Gerard est hollandais. Les Hollandais sont grands de taille, les plus grands d'Europe, mais Gerard est petit, solidement bâti, avec une moustache et un look de bourgeois. Comme Feynman, 't Hooft est très porté sur la compétition, mais je suis sûr de ne jamais avoir pris le dessus avec lui. À la différence de Feynman, il est un pur produit de la vieille Europe – le dernier grand physicien européen, héritier des Einstein et des Bohr. Bien qu'il ait six ans de moins que moi, il m'impressionnait en 1983, et il y avait de quoi. Il s'est vu décerner le prix Nobel en 1999 pour son travail de tout premier plan sur le modèle standard des particules élémentaires.

Mais ce n'est pas de Gerard que je me souviens le plus dans le grenier de Werner. C'est de Stephen Hawking, que je rencontrai là pour la première fois. C'est là que Stephen lâcha la bombe qui déclencha la guerre du trou noir.

1. Le jeu de mots est, comme toujours, difficile à traduire. « *Except the Susskind sandwich would have more ham – Yeah, I responded, but a lot less of baloney.* » *More ham*, « plus de jambon », mais aussi « en ferait trop ». *Less baloney*, « moins de saucisses », mais aussi « moins de bêtises ». (N.d.T.)

Stephen aussi est un metteur en scène. Physiquement, il est tout petit – je serais surpris qu'il pèse plus de cinquante kilos –, mais son petit corps abrite une intelligence prodigieuse et un ego également colossal. À cette époque, Stephen circulait dans une chaise roulante motorisée plus ou moins ordinaire et pouvait encore parler en utilisant sa propre voix, bien qu'il fût très difficile de le comprendre sans avoir passé beaucoup de temps avec lui. Il voyageait entouré d'une infirmière et d'un jeune collègue qui l'écoutait attentivement et répétait ce qu'il avait dit.

En 1983, son traducteur était Martin Rocek, aujourd'hui un physicien célèbre et l'un des pionniers de cette branche importante connue sous le nom de supergravité. Mais, à l'époque du séminaire EST, Martin était tout jeune et peu connu. Je savais cependant, pour l'avoir rencontré auparavant, qu'il s'agissait d'un physicien théoricien tout à fait capable. À un moment de notre conversation, Stephen (par l'intermédiaire de Martin) dit quelque chose qui me paraissait faux. Je me tournai vers Martin pour lui demander quelques éclaircissements de physique. Il me regarda comme une bête traquée. Il me fournit l'explication plus tard : il semble que traduire Stephen requérait une concentration si grande qu'il était en général incapable de suivre le fil de notre discussion. Il savait à peine de quoi nous parlions.

Stephen est une véritable curiosité. Et je ne parle pas de sa chaise roulante ou de ses infirmités évidentes. En dépit de l'immobilité de ses muscles faciaux, son sourire vague est unique, à la fois angélique et diabolique, exprimant un amusement secret. Pendant cette conférence EST, j'ai trouvé que parler avec Stephen était très difficile. Répondre lui prenait beaucoup de temps, et ses réponses étaient en général très brèves. La brièveté de ces réponses – elles tenaient parfois en un mot ! –, son sourire et son esprit presque désincarné étaient déconcertants. C'était comme communiquer avec l'oracle de Delphes. Lorsqu'on posait une question à Stephen, la première réponse était un silence absolu et ce qui sortait au final était souvent incompréhensible. Mais le sourire entendu disait : « Il se peut que *tu* n'aies pas compris ce que j'ai dit mais *moi* oui, et c'est moi qui ai raison. »

Tout le monde voit dans le minuscule Stephen un grand homme, un héros d'un courage extraordinaire et d'une grande force morale. Ceux qui le connaissent voient d'autres facettes : Stephen l'Espiègle et Stephen l'Effronté. Un soir, pendant le séminaire

EST, quelques-uns d'entre nous étions sortis marcher sur une de ces fameuses rues en pente bien raide de San Francisco. Stephen était avec nous, conduisant sa chaise roulante motorisée. Quand nous arrivâmes tout en haut, le sourire diabolique apparut. Sans aucune hésitation, il se lança dans la descente à la vitesse maximale, nous laissant tous ahuris. Nous nous lançâmes à sa poursuite, craignant le pire. Quand nous parvînmes tout en bas, nous le trouvâmes assis et souriant. Il voulait savoir s'il y avait une rue avec une pente plus raide à essayer. Stephen Hawking : le Evel Knievel¹ de la physique !

En fait, Hawking est un véritable casse-cou de la physique. Mais sa plus grande effronterie fut peut-être la bombe qu'il lâcha dans le grenier de Werner.

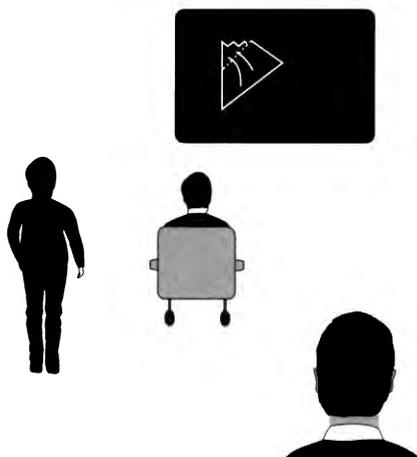
Je n'arrive pas à me rappeler comment s'était organisé son exposé au séminaire EST. Aujourd'hui, dans un séminaire de physique animé par Stephen, il reste tranquillement assis dans sa chaise pendant que la voix désincarnée d'un ordinateur donne lecture d'un texte préenregistré. Cette voix informatisée est devenue la marque de fabrique de Stephen ; aussi plate qu'elle soit, elle est pleine de personnalité et d'humour. Mais, à cette époque-là, c'était peut-être Martin qui traduisait. N'importe : l'exposé eut lieu, la bombe tomba en plein sur Gerard et moi-même.

Stephen affirma que « l'information est perdue lors de l'évaporation d'un trou noir ». Pis, il semblait bien le prouver. Si c'était vrai, Gerard et moi-même nous rendions compte que les fondations de notre discipline seraient détruites. Comment le reste des participants reçurent-ils la nouvelle dans le grenier de Werner ? Comme le coyote du célèbre dessin animé quand il va au-delà de l'à-pic de la falaise : le sol a disparu sous leurs pieds, mais ils ne le savent pas encore.

On dit des cosmologistes qu'ils se trompent souvent mais ne doutent jamais. Si c'est le cas, Stephen n'est qu'un demi-cosmologiste : il ne doute jamais, mais ne se trompe presque jamais. Dans ce cas, pourtant, il s'est trompé. Mais l'« erreur » de Stephen est de celles qui font date dans l'histoire de la physique et pourrait, en fin de compte, conduire à un changement profond de paradigme à propos de la nature de l'espace, du temps et de la matière.

1. Célèbre cascadeur américain, connu dans les années 1970 pour ses sauts spectaculaires réussis autant que pour ses chutes tout aussi spectaculaires, et décédé le 30 novembre 2007. (*N.d.T.*)

L'exposé de Stephen était le dernier ce jour-là. Une heure après, Gerard était toujours planté là, furieux, devant le diagramme sur le tableau de Werner. Tout le monde était parti. Je peux encore voir les sourcils froncés sur le visage de Gerard et le sourire amusé sur celui de Stephen. Il ne s'est presque rien dit. Le moment était électrique.



Sur le tableau, un diagramme de Penrose, représentant un trou noir. Son bord – l'horizon – était figuré par des tirets tandis que la singularité en son centre était représentée par un trait ondulé d'allure inquiétante. Les flèches pointant à travers l'horizon représentaient les séquences d'information tombant au-delà de l'horizon dans la singularité. Pas de flèche de retour. Si l'on suivait Stephen, ces séquences étaient irrémédiablement perdues. Pour rendre les choses pires encore, Stephen avait prouvé que les trous noirs finissaient par s'évaporer et disparaître, ne laissant aucune trace de ce qui était tombé dedans.

La théorie de Stephen allait même plus loin. Il postulait que le vide – l'espace vide – était rempli de trous noirs « virtuels » qui apparaissaient et disparaissaient si vite que nous ne les remarquons pas. Il affirmait que l'action de ces trous noirs virtuels était d'effacer l'information, même s'il n'y avait pas de « véritable » trou noir dans le voisinage.

Au chapitre 7, vous verrez exactement ce qu'« information » veut dire en même temps que ce que cela signifie de la perdre. Pour l'instant, contentez-vous de me croire : c'était un véritable désastre. 'T Hooft et moi le savions mais, à ce moment-là, la

réponse des autres quand ils en entendaient parler était : « Ah bon, l'information est perdue dans les trous noirs. » Stephen lui-même était confiant. En ce qui me concerne, le plus difficile dans mes relations avec Stephen a toujours été l'irritation que je ressens devant son autosuffisance. La perte de l'information était quelque chose qui pouvait tout simplement ne pas être vraie mais cela, Stephen ne pouvait pas le voir.

La conférence prit fin et chacun rentra chez soi. Pour Stephen et Gerard, cela voulait dire respectivement retour à l'université de Cambridge et à celle d'Utrecht. Pour moi, seulement quarante minutes de conduite vers le sud, sur la route 101, en direction de Palo Alto et l'université de Stanford. Il m'était difficile de me concentrer sur la conduite. C'était une froide journée de janvier et, chaque fois que je m'arrêtais ou ralentissais, je dessinais le schéma du tableau de Werner sur le pare-brise plein de givre.

De retour à Stanford, je parlai à mon ami Tom Banks de l'affirmation de Stephen. Nous y avons tous deux réfléchi intensément. Pour essayer d'en savoir plus, j'ai même invité un ancien étudiant de Stephen à venir depuis le sud de la Californie. L'affirmation de Stephen nous rendait méfiants mais, pendant un temps, nous n'étions pas sûrs de savoir pourquoi. En quoi la perte d'une séquence d'information dans un trou noir est-elle si terrible ? Puis, nous avons commencé à comprendre : la perte d'information, c'est la même chose que la création d'entropie. Et créer de l'entropie signifie créer de la chaleur. Les trous noirs virtuels dont Stephen avait si nonchalamment postulé l'existence créeraient de la chaleur dans l'espace vide. Avec un autre collègue, Michael Peskin, nous avons fait une estimation sur la base de la théorie de Stephen. Nous trouvâmes que, si Stephen avait raison, l'espace vide se réchaufferait de mille milliards de milliards de milliards de degrés en une minuscule fraction de seconde. Mais, bien que certain que Stephen avait tort, je ne parvenais pas à trouver la faille dans son raisonnement. C'est peut-être ce qui m'irritait le plus.

La guerre du trou noir qui s'ensuivit fut plus qu'une polémique entre physiciens. C'était aussi une bataille d'idées, ou plutôt une guerre entre des principes fondamentaux. Les principes de la mécanique quantique et ceux de la relativité générale ont toujours donné le sentiment d'être en guerre et il n'était pas évident que les deux puissent coexister. Hawking travaille dans le cadre de la relativité générale et il s'adosse au principe d'équiva-

lence d'Einstein. 'T Hooft et moi-même travaillons dans le cadre de la mécanique quantique et tenons pour certain que ses lois ne peuvent pas être violées sans que soient détruites les fondations de la physique. Dans les trois chapitres qui suivent, je vais camper le décor de la guerre du trou noir en donnant les bases permettant de comprendre les trous noirs, la relativité générale et la mécanique quantique.

2

L'étoile noire

*Il y a plus de choses sur Terre et au Ciel, Horatio,
Que ta philosophie n'en peut rêver.*

WILLIAM SHAKESPEARE, *Hamlet*

C'est à la fin du XVIII^e siècle qu'on a soupçonné pour la première fois que pourrait exister quelque chose comme un trou noir. C'est au grand physicien français Pierre Simon de Laplace et à l'ecclésiastique anglais John Michell que revient cette idée remarquable. Les physiciens de ce temps se passionnaient pour l'astronomie. Tout ce qu'on savait des corps célestes venait de la lumière qu'ils émettent ou de celle qu'ils réfléchissent comme c'est le cas pour la Lune et les planètes. À l'époque de Michell et Laplace, Isaac Newton était mort depuis un demi-siècle mais continuait à avoir une influence déterminante sur les idées en physique. Newton était persuadé que la lumière était composée de particules minuscules, des corpuscules dans sa terminologie, et, dans ces conditions, pourquoi la lumière ne serait-elle pas affectée par la gravitation ? Laplace et Michell se sont donc demandé s'il pouvait exister des étoiles suffisamment massives et denses pour que la lumière ne puisse échapper à leur gravité. S'il existait de telles étoiles, ne seraient-elles pas complètement noires et, par suite, invisibles ?

Un projectile¹ – une pierre, une balle ou même une particule élémentaire – peut-il jamais échapper à l'attraction gravitation-

1. *The American Heritage Dictionary of the English Language* (quatrième édition) définit un projectile comme « un objet tiré, lancé ou propulsé de toute autre façon, telle une balle, et ne disposant d'aucun mode d'autopropulsion ». Un projectile pourrait-il être une particule isolée de lumière ? Pour Michell et Laplace, la réponse était oui.

nelle d'une masse telle que la Terre ? On peut, c'est selon, répondre par oui ou non. Le champ gravitationnel d'un objet massif n'a pas de limite : il s'étend à l'infini, devenant de plus en plus faible avec l'éloignement. Un projectile ne peut donc jamais quitter le champ de pesanteur terrestre. Mais s'il est lancé avec une vitesse suffisante, il continuera à s'éloigner indéfiniment, l'intensité faiblissante du champ de pesanteur se révélant incapable de le faire redescendre à la surface de la Terre. Voilà en quel sens un projectile peut échapper à l'attraction terrestre.

L'homme le plus fort du monde n'a aucun espoir de lancer ainsi une pierre dans l'espace. Un lanceur professionnel de base-ball peut parvenir à un lancer vertical de soixante-dix mètres, soit environ un quart de la hauteur de l'Empire State Building. Si l'on néglige la résistance de l'air, un pistolet peut tirer une balle à une hauteur d'un peu moins de cinq kilomètres. Il y a cependant une vitesse permettant à un objet qui en est animé à son lancement de se libérer de l'attraction terrestre pour s'éloigner dans un mouvement éternel – on l'appelle la *vitesse de libération*. Lancé à n'importe quelle vitesse inférieure à la vitesse de libération, un projectile retombera sur Terre. Lancé à une vitesse supérieure, il s'échappera vers l'infini. La vitesse de libération de la Terre est impressionnante : 11 kilomètres par seconde (soit à peu près 40 000 kilomètres à l'heure)¹.

Pour désigner un corps massif de l'espace, contentons-nous pour l'instant du mot *étoile*, qu'il s'agisse d'une planète, d'un astéroïde ou d'une étoile véritable. La Terre n'est donc qu'une petite étoile, la Lune une plus petite encore, etc. D'après les lois newtoniennes, l'attraction qu'exerce une étoile est proportionnelle à sa masse et il est donc tout à fait naturel que la vitesse de libération en dépende aussi. Mais la masse n'intervient que pour moitié dans notre histoire. L'autre moitié est en rapport avec le rayon de l'étoile. Imaginez la situation suivante : vous êtes sur la Terre mais celle-ci, sous l'effet de quelque force, se contracte, sa taille s'en trouvant réduite. Placé à la surface, vous vous rapprocheriez ainsi de chacun des atomes qui la composent et, de ce fait, l'effet de la pesanteur deviendrait plus important. Votre poids, qui est lié à la

1. La vitesse de libération est une vitesse « idéale » qui ne tient pas compte d'effets tels que la résistance de l'air, ce qui rend donc nécessaire une vitesse bien plus grande.

gravité, augmenterait et, comme on peut s'y attendre, il deviendrait plus difficile de se libérer de l'attraction terrestre. C'est là une illustration d'une loi fondamentale de la physique : la contraction d'une étoile (sans aucune perte de masse) augmente la vitesse de libération.

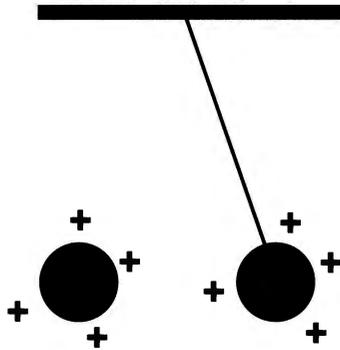
Imaginez maintenant une situation à l'exact opposé : pour quelque raison, la Terre se dilaterait et vous seriez donc plus éloigné de chacun de ses constituants. La pesanteur, en surface, serait alors plus faible et il serait donc plus facile de s'en libérer. La question posée par Michell et Laplace était donc de savoir si une étoile pouvait avoir tout à la fois une masse suffisamment importante et une taille suffisamment réduite pour que sa vitesse de libération soit plus grande que la vitesse de la lumière.

Quand ils ont émis cette idée prophétique, on connaissait la vitesse de la lumière (représentée par la lettre c) depuis plus d'un siècle. L'astronome danois Ole Rømer avait, en 1676, déterminé que c avait la valeur stupéfiante de 300 000 kilomètres (plus de sept fois le tour de la Terre) par seconde.

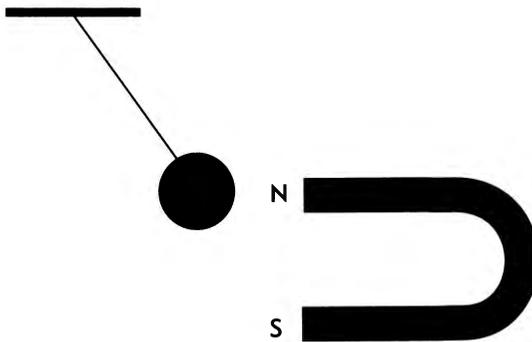
$$c = 300\,000 \text{ kilomètres par seconde}$$

Avec une telle vitesse, il faudrait une masse énorme ou très concentrée pour piéger la lumière ; il n'y avait cependant aucune raison évidente pour que cela ne se produisît pas. L'article de Michell adressé à la Royal Society était la première mention de ces objets que John Wheeler appellera plus tard des *trous noirs*.

Cela vous surprendra peut-être d'apprendre que, parmi les forces, celles qui sont dues à la pesanteur sont très faibles. Des athlètes pratiquant le lancer de poids ou le saut en hauteur peuvent voir les choses autrement mais une expérience simple montre combien l'attraction gravitationnelle est faible. Prenez quelque chose de léger : une petite boule de polystyrène expansé fera l'affaire. D'une façon ou d'une autre, chargez-la d'électricité statique (par exemple en la frottant contre votre pull-over), puis accrochez-la à un support par un fil. Quand elle aura fini de se balancer, le fil sera vertical. Approchez maintenant une autre boule, chargée de la même façon, de celle qui est suspendue. La force électrostatique va repousser cette dernière dont le fil a désormais dévié de la verticale.

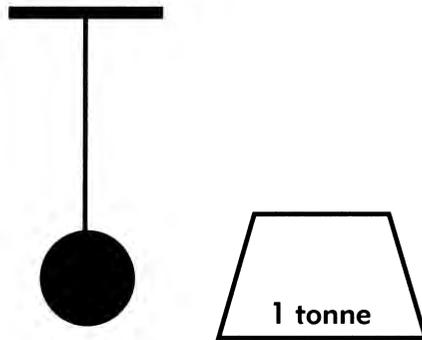


On peut obtenir la même chose avec un aimant si le poids suspendu est en fer.



Débarrassez-vous maintenant de la deuxième boule chargée, ou de l'aimant, et essayez de faire dévier de la verticale le fil de celle qui est suspendue en approchant une masse très lourde. L'attraction gravitationnelle que cette dernière exerce va agir sur la boule suspendue mais son effet sera bien trop petit pour être perçu : les forces dues à la gravitation sont infimes par rapport aux forces électriques ou magnétiques.

Puisque la gravité est si faible, pourquoi ne pouvons-nous pas rejoindre la Lune d'un simple saut ? La réponse est que l'énorme masse de la Terre – 6×10^{24} kilogrammes – compense facilement la faiblesse de la gravitation. Mais même avec une masse pareille, la vitesse de libération de la Terre est inférieure à un dix millième de la vitesse de la lumière. L'étoile noire imaginée par Michell et Laplace devra présenter une masse et une compression formidables pour que sa vitesse de libération dépasse c .



Pour vous donner une simple idée des ordres de grandeur de ce dont nous parlons, examinons les vitesses de libération de quelques astres. S'échapper de l'attraction terrestre nécessite une vitesse initiale d'environ 11 kilomètres par seconde. Une telle vitesse est, selon des critères terrestres, très grande. Comparée à celle de la lumière, elle n'est qu'un lent ralenti.

Vous auriez plus de chances de vous libérer de l'attraction d'un astéroïde que de celle de la Terre. Un astéroïde d'un rayon de 1,5 kilomètre a une vitesse de libération d'environ 2 mètres par seconde : le saut serait aisé. À l'opposé, le Soleil a une masse et un rayon bien plus importants que ceux de la Terre¹ et ces deux facteurs agissent en sens contraire l'un de l'autre. Une masse plus grande rend plus difficile de s'échapper de la surface tandis qu'un rayon plus grand rend cela plus simple. Mais c'est la masse qui l'emporte et la vitesse de libération du Soleil est à peu près cinquante fois plus grande que celle de la Terre. Ce qui reste tout de même beaucoup plus lent que la vitesse de la lumière.

Toutefois, le Soleil n'est pas destiné à conserver indéfiniment la même taille. Une étoile finit par manquer de carburant et la pression vers l'extérieur provoquée par sa chaleur interne tombe en panne. La gravité agit alors comme un étau géant, comprimant l'étoile jusqu'à une petite fraction de sa taille d'origine. Dans cinq milliards d'années, notre Soleil aura épuisé ses ressources et se réduira jusqu'à devenir ce que nous nommons une *naine blanche*, d'un rayon du même ordre que celui de la Terre. Se libérer de sa gravité nécessitera alors une vitesse de 6 500 kilomètres par

1. La masse du Soleil est d'environ 2×10^{30} kilogrammes. C'est à peu près un demi-million de fois celle de la Terre. Le rayon du Soleil est d'environ 700 000 kilomètres, à peu près cent fois celui de la Terre.

seconde : c'est rapide, mais ne représente toujours que 2 % de la vitesse de la lumière.

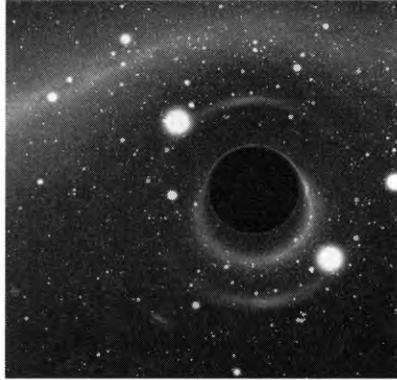
Si le Soleil était un tout petit peu plus lourd – environ une fois et demie sa masse actuelle –, ce surcroît de masse le conduirait à être comprimé au-delà de l'étape de la naine blanche. Les électrons de l'étoile s'incorporeraient aux protons pour former une boule de neutrons d'une densité incroyable. Une étoile à neutrons est si dense qu'une simple cuillerée de sa matière aurait une masse d'environ cinq milliards de tonnes. Mais une étoile à neutrons n'est toujours pas noire : sa vitesse de libération se rapproche de celle de la lumière (autour de 80 % de c), mais ne l'atteint pas.

Si l'étoile en train de s'effondrer sur elle-même était plus lourde – disons cinq fois la masse du Soleil –, même la boule de neutrons très dense ne pourrait résister à l'effondrement gravitationnel. Dans une implosion finale, elle serait réduite à une *singularité* – un point d'une densité et d'un pouvoir destructeur pratiquement infinis. La vitesse de libération de ce minuscule centre dépasserait de loin la vitesse de la lumière. Une étoile (noire) serait née – ou, comme nous le disons de nos jours, un trou noir.

Einstein détestait cette idée des trous noirs à tel point qu'il en avait évacué la possibilité et expliqué qu'il ne pourrait jamais s'en former. Mais, que cela lui ait plu ou non, ils existent. Ils constituent aujourd'hui un objet d'étude banal pour les astronomes et pas seulement sous la forme d'étoiles individuelles effondrées : au centre des galaxies, des millions, voire des milliards, d'étoiles se sont fondues en des géants noirs.

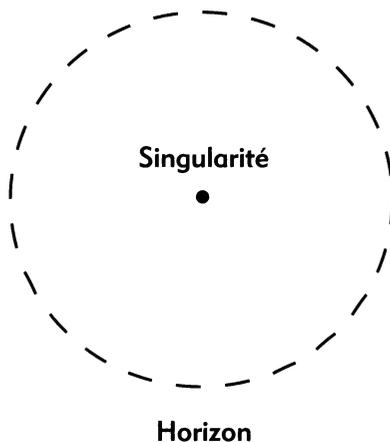
Le Soleil n'est pas assez massif pour se comprimer jusqu'à devenir un trou noir. Si nous pouvions l'aider, à l'aide d'un étai cosmique, à acquérir un rayon de trois kilomètres, il en deviendrait un. Peut-être pensez-vous que, si l'on relâchait la pression de l'étai, il pourrait revenir à un rayon d'une dizaine de kilomètres ; en fait, ce serait déjà trop tard : la matière du Soleil serait engagée dans une sorte de chute libre et, dans la compression, elle aurait tôt fait de passer en dessous du seuil du kilomètre, puis du mètre et du centimètre. Rien ne pourrait l'empêcher de former une singularité et la terrible implosion serait irréversible.

Si nous nous trouvons près d'un trou noir mais à l'écart de la singularité, la lumière émise depuis l'endroit où nous sommes lui échapperait-elle ? Cela dépend à la fois de la masse du trou noir et



Simulation d'un trou noir géant de 10 masses solaires
(par Alain Riazuelo, astrophysicien à l'Institut d'astrophysique de Paris [N.d.E.])

de la position précise à partir de laquelle la lumière entame son trajet. L'univers est partagé en deux par une sphère imaginaire appelée *horizon*. Toute lumière émise à l'intérieur de cet horizon sera inévitablement aspirée par le trou noir, au contraire de celle qui est émise à l'extérieur et qui esquivera son attraction. Si le Soleil devait jamais devenir un trou noir, le rayon de son horizon serait d'un peu plus de trois kilomètres.



Le rayon de l'horizon est appelé *rayon de Schwarzschild*. Son nom lui vient de l'astronome Karl Schwarzschild qui, le premier, a étudié les mathématiques des trous noirs. Ce rayon dépend de la masse du trou noir – en fait, il lui est directement proportionnel.

Par exemple, si la masse du Soleil était un millier de fois plus grande, un rayon lumineux émis à trois ou cinq kilomètres n'aurait aucune chance de s'échapper : le rayon de l'horizon aurait lui aussi été multiplié par mille et serait donc de plus de trois mille kilomètres.

La proportionnalité entre masse et rayon de Schwarzschild est la première chose qu'apprend un physicien sur les trous noirs. La Terre a une masse de l'ordre d'un million de fois plus petite que celle du Soleil et il en est donc de même de son rayon de Schwarzschild. Il faudrait la réduire aux dimensions d'une myrtille pour en faire une étoile noire. À l'opposé, tapi au centre de notre galaxie, il y a un énorme trou noir dont le rayon de Schwarzschild est d'environ cent cinquante millions de kilomètres – soit à peu près la distance moyenne de la Terre au Soleil. Dans d'autres bulles de l'univers, il en est même de plus monstrueux !

Rien n'est plus violent que la singularité d'un trou noir. Impossible de survivre à ses forces d'une intensité infinie. Einstein était si horrifié par cette idée de singularité qu'il s'est dressé contre elle. Mais point d'issue : irrésistible est l'écrasante attraction de son centre.

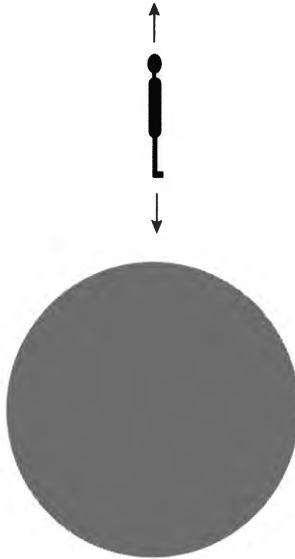
Les marées et l'Homme-qui-mesure-trois-mille-kilomètres

Qu'est-ce qui fait que les mers montent et redescendent, comme une gigantesque respiration, deux fois par jour ? C'est la Lune, bien sûr. Mais comment fait-elle et pourquoi deux fois par jour ? Je vais vous l'expliquer mais, auparavant, je dois vous parler de l'Homme-qui-mesure-trois-mille-kilomètres.

Imaginez-le – un géant qui fait trois mille kilomètres de la tête aux pieds – en train de tomber, les pieds en bas, depuis l'espace vers la Terre. Loin, dans l'espace, la pesanteur est faible, si faible qu'il ne sent rien. Mais, à l'approche de la Terre, il commence à éprouver d'étranges sensations le long de son corps immense – pas tant celle de tomber que d'être étiré.

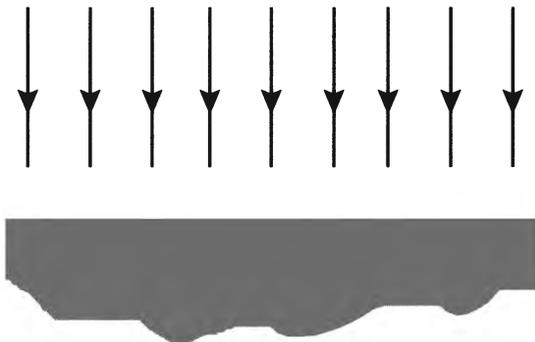
Son problème ne vient pas de l'accélération globale dans la chute vers la Terre : ce qui le gêne vient de ce que la pesanteur n'est pas uniforme dans l'espace. Loin de la Terre, elle n'existe presque pas. Par contre, alors qu'il se rapproche, son intensité augmente. Pour l'Homme-qui-mesure-trois-mille-kilomètres, cela engendre des tracas même pendant sa chute libre. Ce pauvre bougre est si

immense que l'attraction exercée sur ses pieds est bien plus grande que celle qui affecte sa tête. Le résultat est la désagréable sensation qu'on lui tire les pieds d'un côté et la tête de l'autre.



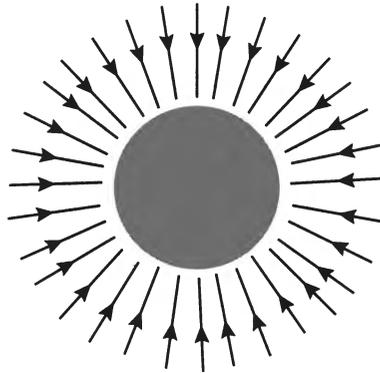
Peut-être peut-il éviter cet étirement en se mettant à l'horizontale pendant sa chute, les pieds et la tête à la même altitude ? Sitôt qu'il essaye, il doit subir un nouveau désagrément : il se sent désormais comprimé autant qu'il était étiré et a l'impression que sa tête s'enfonce vers ses pieds...

Pour comprendre ce qui se passe, imaginons un instant que la Terre soit plate. Voici ce que cela donnerait : les lignes verticales fléchées indiquent à la fois la direction et le sens des forces dues à la pesanteur – pas de surprise, elles pointent droit vers le bas. Mais,

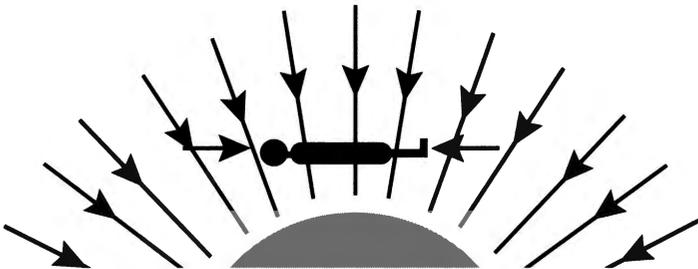


surtout, l'intensité des forces de pesanteur est complètement uniforme. L'Homme-qui-mesure-trois-mille-kilomètres n'aurait aucun problème dans une telle configuration, qu'il tombe en position verticale ou horizontale – du moins tant qu'il n'aura pas atteint le sol.

Mais la Terre n'est pas plate. Tant l'intensité que la direction de la pesanteur varient. Au lieu d'exercer son action dans une seule direction, la pesanteur le fait aller droit vers le centre de la planète, comme ceci :

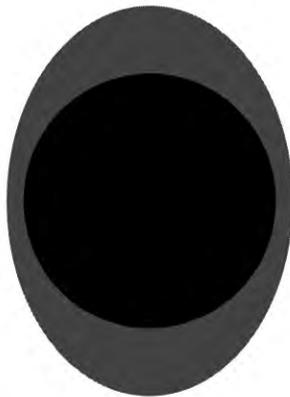


Voilà ce qui crée un nouveau problème à notre géant s'il tombe en position horizontale : les forces qui s'exercent sur ses pieds et sa tête ne sont pas les mêmes parce que la pesanteur, qui attire vers le centre de la Terre, poussera sa tête vers ses pieds, lui donnant la sensation étrange d'être comprimé.



Mais revenons aux marées. La raison des flux et des reflux biquotidiens est exactement la même que celle qui engendrait les désagréments de notre géant : la pesanteur n'est pas uniforme. En l'occurrence, il s'agit de celle de la Lune et non de celle de la

Terre. La Lune attire les océans plus du côté de la Terre qui lui fait face que de l'autre. Vous vous attendriez peut-être à ce qu'elle crée un renflement unique du côté qui lui est le plus proche, mais les choses ne sont pas ainsi. Pour la même raison que celle qui faisait que la tête du géant s'écartait de ses pieds, l'eau, des deux côtés de la Terre – celui qui est le plus proche comme celui qui est le plus éloigné –, crée un renflement qui s'éloigne du centre. Une façon de voir les choses est la suivante : sur la face qui lui est la plus proche, la Lune éloigne l'eau de la Terre tandis que, sur l'autre, c'est la Terre qu'elle éloigne de l'eau. En fin de compte, nous avons deux renflements sur les faces opposées de la Terre, l'un s'étirant vers la Lune, l'autre s'en éloignant. Comme la Terre fait un tour complet en une journée, il en résulte que chaque point connaît deux marées hautes quotidiennes.



Ces forces, déformantes, engendrées par les variations de l'intensité et de la direction de la pesanteur sont appelées *forces de marée*, qu'elles aient pour origine la Lune, la Terre, le Soleil ou tout autre corps céleste. Des humains de taille normale peuvent-ils ressentir les effets des forces de marée – par exemple en sautant

d'un plongeur ? La réponse est non mais uniquement parce que nous sommes trop petits pour que la variation du champ de pesanteur terrestre soit perceptible le long de nos corps.

Descente aux Enfers

J'entrai par le chemin difficile et sauvage.

DANTE, *La Divine Comédie*

Les effets des forces de marée ne seraient pas aussi insignifiants sur vous si vous tombiez vers un trou noir d'une masse solaire. Une telle masse réduite au volume minuscule qu'occuperait ce trou noir ne se contenterait pas de rendre l'attraction gravitationnelle très intense au voisinage de l'horizon, elle en ferait quelque chose qui ne serait pas du tout uniforme. Bien avant d'atteindre le rayon de Schwarzschild, à plus de 150 000 kilomètres du trou noir, les forces de marée commenceraient à vous gêner vraiment. Tout comme l'Homme-qui-mesure-trois-mille-kilomètres, vous seriez trop grand pour la rapide variation du champ gravitationnel du trou noir. À l'approche de ce dernier, vous seriez déformé, presque à la façon de la pâte dentifrice sortant du tube.

Il y a deux remèdes aux forces de marée à l'horizon d'un trou noir : ou bien vous rapetissez ou bien le trou noir doit s'agrandir. Une bactérie ne ressentirait pas les effets de ces forces à l'horizon d'un trou noir d'une masse solaire pas plus que vous s'il s'agit d'un million de masses solaires. Cela peut paraître contre-intuitif dans la mesure où une masse plus importante exerce une attraction plus forte. Mais on négligerait là un fait essentiel : l'horizon d'un trou noir plus grand serait tellement vaste qu'il apparaîtrait comme étant presque plat. Près de l'horizon, le champ de pesanteur serait sans doute très intense mais pratiquement uniforme.

Si vous avez des notions sur la gravitation newtonienne, vous pouvez calculer les forces de marée à l'horizon d'une étoile noire. Le résultat est que plus grande et massive est cette dernière, plus faibles sont les forces de marée à l'horizon. C'est pourquoi traverser l'horizon d'un très gros trou noir se ferait sans encombre. Mais, en fin de compte, il n'y a pas d'échappatoire aux forces de marée, même pour le plus grand des trous noirs. La grande taille ne ferait que reculer l'issue inévitable. À la fin, l'inéluctable descente

vers la singularité serait aussi terrifiante que toutes les tortures imaginées par Dante ou que Torquemada a infligées pendant l'Inquisition en Espagne. (Le supplice du chevalet s'impose à l'esprit.) La plus petite bactérie elle-même serait disloquée verticalement et écrabouillée horizontalement. Les petites molécules survivraient plus longtemps que les bactéries et les atomes encore un peu plus. Mais, tôt ou tard, la singularité l'emporterait, même contre un simple proton. Je ne sais pas si Dante avait raison quand il affirmait que nul pécheur ne peut échapper aux tourments de l'enfer mais je suis absolument certain que rien ne peut esquiver les terribles forces de marée de la singularité d'un trou noir.

Mais ce ne sont pas dans ces propriétés peu familières et brutales d'une singularité que gisent les mystères les plus profonds des trous noirs. Nous savons ce qui arrive à l'infortuné objet happé par une singularité, et c'est plutôt moche ! Mais, agréable ou non, une singularité suscite bien moins de paradoxes que l'horizon. Dans la physique moderne, il n'est pratiquement rien qui ait semé autant le trouble que la question : qu'advient-il de la matière quand elle traverse l'horizon ? Quelque réponse que vous donniez, elle est probablement fausse...

Michell et Laplace ont vécu bien avant la naissance d'Einstein et ne pouvaient pas soupçonner les deux découvertes qu'il ferait en 1905. La première a été la théorie de la relativité restreinte qui repose sur le principe que rien – ni les rayons lumineux ni quoi que ce soit – ne peut dépasser la vitesse de la lumière. Michell et Laplace comprenaient que la lumière ne pouvait s'échapper d'une étoile noire, mais ils ne se rendaient pas compte que rien d'autre ne le pouvait.

La seconde découverte d'Einstein de 1905 a été que la lumière est vraiment faite de particules. Peu après les spéculations de Michell et Laplace sur les étoiles noires, la théorie de Newton sur la nature corpusculaire de la lumière est tombée en disgrâce. Sa nature ondulatoire s'est de plus en plus imposée comme évidente, à l'instar des ondes sonores ou des vagues à la surface de la mer. C'est autour de 1865 que James Clerk Maxwell a établi que la lumière consiste en ondulations de *champs électriques et magnétiques* se propageant à travers l'espace à la vitesse de la lumière, sonnante ainsi le glas de la théorie corpusculaire. Il semble bien que personne n'ait jamais pensé que les ondes électromagnétiques puissent aussi être sensibles à la gravité : les étoiles noires ont sombré dans l'oubli...

En tout cas jusqu'en 1917, année où l'astronome Karl Schwarzschild a résolu les équations de la toute nouvelle théorie de la relativité générale d'Einstein, redécouvrant ainsi ces objets oubliés¹.

Le principe d'équivalence

Comme l'essentiel de l'œuvre d'Einstein, la théorie de la relativité générale est difficile et subtile, mais elle est issue d'observations extrêmement simples. Si simples, en fait, que n'importe qui aurait pu les faire – sauf que ce n'est pas arrivé !

Einstein avait l'art de tirer des conclusions très pénétrantes des expériences de pensée les plus élémentaires. (À titre personnel, j'ai toujours admiré par-dessus tout cette façon de raisonner.) Dans le cas de la relativité générale, cela impliquait un observateur dans un ascenseur. Les manuels modernisent souvent l'ascenseur en vaisseau spatial mais, à l'époque d'Einstein, les ascenseurs constituaient le nec plus ultra de la technologie. Il a tout d'abord imaginé l'ascenseur flottant librement dans l'espace, loin de la gravitation de tout objet : une situation où l'on ne ressentirait strictement aucun poids,



tandis que les projectiles se déplaceraient à vitesse constante selon des trajectoires rectilignes. Il en serait de même des rayons lumineux, à la vitesse de la lumière bien évidemment.

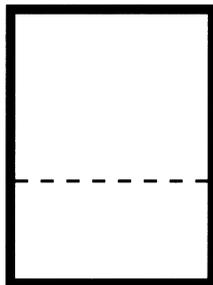
Einstein a ensuite imaginé ce qui se produirait au cas où l'ascenseur subirait une accélération vers le haut, par exemple au

1. Les trous noirs se présentent sous différentes formes. En particulier, si l'étoile originelle était en rotation (ce que font peu ou prou toutes les étoiles), ils peuvent tourner autour d'un axe. Ils peuvent aussi être chargés électriquement : faire tomber des électrons dans un trou noir chargerait électriquement celui-ci. Seuls les trous noirs qui ne sont pas en rotation ni ne sont chargés sont appelés trous noirs de Schwarzschild.

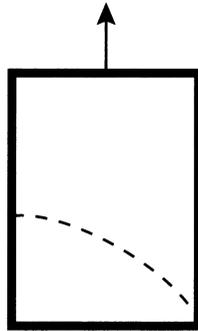
moyen d'un câble fixé à un point d'ancrage distant ou de fusées disposées dessous. Les passagers seraient repoussés vers le sol et la trajectoire des projectiles s'incurverait vers le bas, en des orbites paraboliques. Tout se passerait comme si les choses étaient sous l'influence de la pesanteur. Ce sont là des faits bien connus depuis Galilée, mais c'est Einstein qui a fait de ces observations toutes simples un nouveau et puissant principe de la physique : le principe d'équivalence affirme qu'il n'y a strictement aucune différence entre les effets de la pesanteur et ceux de l'accélération. Aucune expérience réalisée à l'intérieur de l'ascenseur ne permettrait de savoir si ce dernier se trouve dans un champ gravitationnel ou subit une accélération dans l'espace.

En soi, il n'y avait là rien d'extraordinaire mais les conséquences étaient d'une importance capitale. Au moment où Einstein formulait le principe d'équivalence, on ne savait pas grand-chose sur la façon dont la gravité affectait des phénomènes tels que le passage du courant électrique, le comportement des aimants ou la propagation de la lumière. La méthode suivie par Einstein a été de commencer par calculer quelle influence avait l'accélération sur de tels phénomènes. Généralement, cela ne nécessitait l'emploi d'aucune physique nouvelle, inconnue. Tout ce qu'il avait à faire était de se représenter comment des phénomènes connus pourraient être regardés dans un ascenseur en accélération, le principe d'équivalence lui disant alors les effets de la gravité.

Le premier exemple concernait le comportement de la lumière dans un champ de gravité. Imaginez un faisceau de lumière se déplaçant horizontalement à travers l'ascenseur de la gauche vers la droite. Si l'ascenseur se déplaçait librement, loin de toute masse, la lumière se déplacerait selon une trajectoire horizontale parfaitement rectiligne.



Que se passe-t-il quand l'ascenseur subit une accélération vers le haut ? La lumière part horizontalement de la gauche mais, du fait de l'accélération de l'ascenseur, à l'instant où elle arrive de l'autre côté, il apparaît que son mouvement a une composante verticale orientée vers le bas. On peut voir cela en disant que c'est l'ascenseur qui a accéléré vers le haut mais, pour un passager, c'est la lumière qui paraît avoir subi une accélération vers le bas.



En fait, le chemin emprunté par un rayon lumineux s'incurve de la même façon que la trajectoire d'une particule très rapide. Cet effet n'a aucun rapport avec la nature ondulatoire ou corpusculaire de la lumière : ce n'est que la conséquence d'une accélération vers le haut. Mais Einstein a fait remarquer que, si l'accélération incurve la trajectoire du rayon lumineux, la gravité doit en faire autant. En fait, il faudrait dire que la pesanteur agit sur la lumière et la fait tomber. Ce qui est très exactement ce que Michell et Laplace avaient deviné.

Mais cette histoire a une autre facette : si l'accélération peut simuler les effets de la pesanteur, elle peut aussi les annuler. Supposez désormais que notre ascenseur n'est plus infiniment loin dans l'espace mais en haut d'un gratte-ciel. Tant qu'il y reste, les passagers ressentent pleinement les effets de la pesanteur, y compris la courbure des rayons lumineux qui traversent l'ascenseur. Mais si le câble de l'ascenseur est cassé net, ce dernier subit une accélération vers le sol. Pendant la courte durée de la chute libre, la gravité à l'intérieur de l'ascenseur semble complètement annulée¹. Les passagers flottent dans la cabine sans plus savoir où sont le

1. Je suppose ici que l'ascenseur est suffisamment petit pour que les forces de marée soient négligeables.

haut et le bas. Les particules et les faisceaux lumineux traversent en de parfaites lignes droites. Telle est l'autre facette du principe d'équivalence.

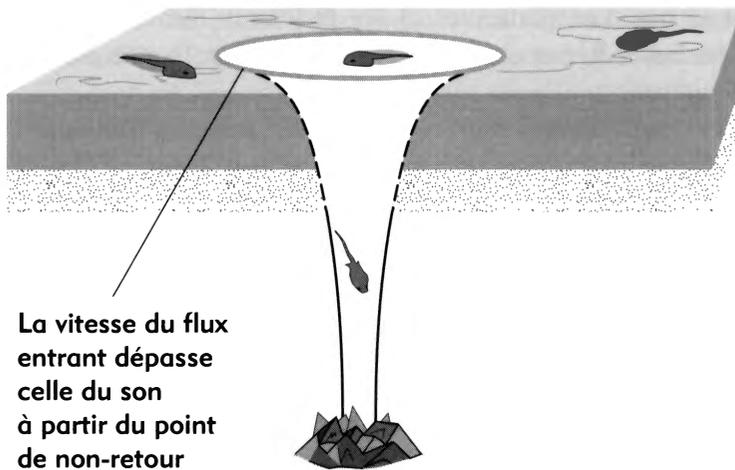
Trous de drainage, trous silencieux et trous noirs

Quiconque s'essaie à décrire la physique moderne sans avoir recours aux formules de mathématiques sait tout le profit qu'on peut tirer des analogies. Par exemple, il est très commode d'imaginer un atome comme étant un minuscule système solaire ; ou encore, utiliser la mécanique classique newtonienne pour décrire une étoile noire peut aider celui qui n'est pas prêt à se plonger dans les mathématiques poussées de la relativité générale. Mais les analogies ont leurs limites et l'analogie de l'étoile noire est prise en défaut quand on la pousse trop loin. Mais il y a une autre analogie qui réussit mieux. Je la tiens d'un des pionniers de la mécanique quantique des trous noirs, Bill Unruh. Peut-être me plaît-elle tout particulièrement du fait de mon premier métier de plombier.

Imaginez un lac peu profond mais infini : il n'a que quelques dizaines de centimètres de profondeur mais s'étend à l'infini dans toutes les directions horizontales. Une espèce aveugle de têtards y vit, sans aucune notion de ce qu'est la lumière ; par contre, ils sont parfaitement rodés à utiliser le son pour repérer les objets et communiquer entre eux. Il y a une règle intangible : rien ne peut se déplacer dans l'eau plus vite que le son. La plupart du temps, cette limitation de la vitesse est sans importance dans la mesure où les têtards se déplacent bien plus lentement que le son.

Ce lac recèle un grand danger : de nombreux têtards l'ont découvert trop tard pour en réchapper et aucun n'en est revenu pour raconter l'histoire. Au centre du lac, il y a un trou de drainage. L'eau se déverse à travers le drain vers une caverne située au-dessous où elle tombe en cascade sur des rochers aux pointes mortelles.

Si l'on observe le lac du dessus, on peut voir l'eau se déplacer à travers le drain. Loin du drain, la vitesse est si lente qu'elle en est indétectable mais, plus près, elle accélère. Supposons que le drain évacue l'eau si rapidement qu'à une certaine distance sa vitesse égale celle du son. Plus près encore du drain, la vitesse devient



supersonique. Nous sommes désormais devant un drain très dangereux.

Les têtards qui flottent dans l'eau ne connaissent rien d'autre que leur environnement liquide et n'ont donc aucune idée de la vitesse à laquelle ils se déplacent : autour d'eux, tout se déplace à la même vitesse. Le grand danger est qu'ils peuvent être aspirés par le drain et, ensuite, détruits sur les rochers pointus. En fait, une fois que l'un d'entre eux a franchi le rayon du disque où la vitesse excède celle du son, il est perdu. Une fois franchi le point de non-retour, il ne peut remonter le courant ni envoyer un signal d'alerte à qui que ce soit qui se trouve dans la zone de sécurité (aucun signal audible ne peut se déplacer dans l'eau plus vite que le son !). Unruh appelle le trou de drainage et son point de non-retour un *trou silencieux* du fait qu'aucun son ne peut s'en échapper.

Un des aspects les plus intéressants de ce point de non-retour est qu'un observateur non averti qui le dépasserait ne remarquerait, au début, rien qui sorte de l'ordinaire. Il n'y a ni poteau indicateur ni sirène d'alarme pour l'avertir, rien pour l'empêcher de passer, rien qui le prévienne de l'imminence du danger. À certain moment, tout semble aller bien et, l'instant suivant, tout continue à aller bien. Passer le point de non-retour est un non-événement.

Un têtard dérivant librement, appelons-le Alice, flotte vers le drain tout en chantant pour son ami Bob, qui est très loin. Comme tous les têtards de son espèce aveugle, elle a un répertoire très limité. La seule note qu'elle puisse chanter est un *do* central, avec

une fréquence de 262 périodes par seconde – en jargon technique : de 262 hertz (Hz)¹. Tant qu'Alice est loin du drain, son mouvement est pratiquement imperceptible. Bob écoute le son de la voix d'Alice et il entend un *do* central. Mais Alice prend de la vitesse, le son devient plus grave, en tout cas aux oreilles de Bob ; le *do* devient *si*, puis *la*. La raison en est l'*effet Doppler* si familier, que nous pouvons entendre quand un train lancé à pleine vitesse passe en actionnant son sifflet. Tant que le train s'approche de vous, le son du sifflet vous paraît plus aigu qu'au conducteur du train. Puis, quand il vous dépasse et s'éloigne, le son du sifflet devient plus grave. Chacune des oscillations successives doit parcourir une distance légèrement plus grande que la précédente et parvient à vos oreilles avec un léger retard. La durée entre deux oscillations successives est étirée et vous entendez une plus basse fréquence. Si, de plus, le train prend de la vitesse en s'éloignant, les fréquences perçues seront de plus en plus basses.

La même chose se produit pour la note produite par Alice à mesure qu'elle dérive vers le point de non-retour. Au début, Bob entend la note à 262 Hz. Puis elle descend à 200 Hz, puis 100 Hz, 50 Hz, et ainsi de suite. Il faut une durée extrêmement longue à un son produit tout près du point de non-retour pour s'en échapper : le mouvement de l'eau annule presque le mouvement du son sortant, le ralentissant au point de presque l'immobiliser. Bientôt, le son produit devient si grave que Bob ne peut plus l'entendre sans un équipement spécial.

Mais Bob peut avoir un tel équipement qui lui permette de faire la mise au point des ondes sonores et ainsi se faire une image d'Alice tandis qu'elle s'approche du point de non-retour. Mais les ondes sonores successives mettent de plus en plus de temps à atteindre Bob : tout ce qui vient d'Alice semble ralenti. Sa voix devient plus grave, mais pas seulement. Les ondulations de ses bras ralentissent jusqu'à presque s'immobiliser. La toute dernière onde que Bob peut détecter semble durer une éternité. En fait, il semble à Bob qu'Alice mettra un temps infini à atteindre le point de non-retour.

Pendant ce temps, Alice ne remarque rien d'étrange. Elle dérive tranquillement au-delà du point de non-retour sans aucune

1. Le hertz, dont le nom vient du physicien allemand du XIX^e siècle Heinrich Hertz, est une unité de fréquence. Un hertz représente une fréquence d'une période par seconde.

sensation de ralentissement ou d'accélération. Ce n'est que plus tard, quand elle sera précipitée vers les rochers mortels, qu'elle se rendra compte du danger. Nous voyons là un des points clefs d'un trou noir : des observateurs différents ont paradoxalement des perceptions différentes des mêmes événements. Pour Bob, qui se fie du moins au son qu'il entend, Alice met une éternité à se rapprocher du point de non-retour tandis que, pour cette dernière, cela se fait en un clin d'œil.

Vous avez sans doute deviné que le point de non-retour est, dans cette analogie, l'équivalent de l'horizon d'un trou noir. Remplacez « son » par « lumière » (souvenez-vous que rien ne peut aller plus vite que la lumière) et vous aurez une image assez précise des propriétés d'un trou noir de Schwarzschild. Comme dans le cas du trou de drainage, quoi que ce soit qui dépasse l'horizon ne peut s'échapper ou simplement rester immobile. Dans un trou noir, le danger ne vient pas de rochers pointus mais de la singularité qui se tient en son centre. Toute matière à l'intérieur de l'horizon sera happée vers la singularité où elle sera tassée à une pression et une densité infinies.

Munis de notre analogie du trou silencieux, bien des choses paradoxales concernant les trous noirs s'éclairent. Par exemple, considérons Bob, qui n'est plus un têtard mais un astronaute sur une station spatiale, se tenant en orbite autour d'un trou noir à une distance de sécurité tandis qu'Alice est en train de tomber vers l'horizon non pas en chantant – il n'y a pas d'air dans l'espace pour transporter sa voix – mais en se signalant à l'aide d'une torche électrique produisant une lumière bleue. Pendant sa chute, Bob voit la lumière descendre la gamme des fréquences du bleu au rouge, puis à l'infrarouge, aux micro-ondes et, en fin de compte, aux ondes radio de basse fréquence. Alice elle-même semble devenir de plus en plus léthargique, ralentissant jusqu'à l'immobilité. Bob ne la voit jamais tomber à travers l'horizon : pour lui, elle met un temps infini pour atteindre le point de non-retour. Mais, dans son propre cadre de référence, Alice tombe au-delà de l'horizon et ne commence à se sentir bizarre que lorsqu'elle s'approche de la singularité.

L'horizon d'un trou noir de Schwarzschild se situe au rayon de Schwarzschild. Alice est sans doute condamnée quand elle traverse l'horizon mais, à l'instar des têtards, elle dispose d'un certain temps avant d'être détruite par la singularité. Combien de temps ?

Cela dépend de la taille, ou de la masse, du trou noir. Plus grande sera la masse, plus grand sera le rayon de Schwarzschild et plus long sera le temps dont Alice disposera. Pour un trou noir de la masse du Soleil, Alice disposerait seulement d'environ dix microsecondes. Pour un trou noir au centre d'une galaxie, qui peut représenter un milliard de masses solaires, Alice disposerait d'un milliard de microsecondes, soit en gros une demi-heure. On peut même imaginer des trous noirs plus massifs où Alice pourrait passer sa vie entière, voire où pourraient vivre et mourir plusieurs générations de descendants d'Alice, avant que la singularité ne les détruise.

Bien entendu, d'après les observations de Bob, Alice n'atteindra jamais l'horizon. Qui a raison ? Va-t-elle atteindre l'horizon oui ou non ? Qu'arrive-t-il réellement ? Y a-t-il un *réellement* ? La physique est, après tout, une science d'observations et d'expériences et l'on peut dire des observations de Bob qu'elles ont leur propre validité, bien qu'elles soient en apparent conflit avec la description d'Alice des événements. (Nous retrouverons Alice et Bob dans d'autres chapitres, une fois que nous aurons discuté des propriétés quantiques stupéfiantes des trous noirs découvertes par Jacob Bekenstein et Stephen Hawking.)

L'analogie du drainage convient à de nombreuses situations mais, comme toutes les analogies, elle a ses limites. Par exemple, quand un objet tombe à travers l'horizon, sa masse s'ajoute à celle du trou noir. Cette augmentation de la masse entraîne un agrandissement de l'horizon. On pourrait certainement modéliser cela dans l'analogie du drainage en installant une pompe au canal de drainage pour contrôler le flux. Chaque fois que quelque chose tombe dans le drainage, la pompe tournerait un peu plus vite, accélérant le flux et repoussant le point de non-retour un peu plus loin. Mais le modèle perdrait vite sa simplicité¹ !

Une autre propriété des trous noirs est qu'ils sont eux-mêmes des objets mobiles. Si vous mettez un trou noir dans le champ de gravitation d'une autre masse, il sera accéléré, comme n'importe quelle masse. Il peut même tomber dans un trou noir plus grand. Si nous essayions de représenter toutes ces situations de trous noirs réels à

1. Le professeur George Ellis m'a rappelé une subtilité qui se produit quand le flux est variable. Dans ce cas, le point de non-retour ne coïncide pas exactement avec le point où la vitesse de l'eau égale celle du son. Dans le cas des trous noirs, la subtilité correspondante est la différence entre l'horizon apparent et l'horizon réel.

l'aide de l'analogie du drainage, cette dernière deviendrait plus compliquée que les mathématiques qu'elle est supposée éviter. Mais, en dehors de ces limites, le drainage est une représentation très comode qui permet de comprendre les situations de base à propos des trous noirs sans maîtriser les équations de la relativité générale.

Quelques formules pour ceux qui les apprécient

J'ai écrit ce livre pour le lecteur ayant le moins d'inclination pour les mathématiques mais, pour ceux qu'un peu de maths ne rebute pas, voici quelques formules et ce qu'elles signifient. Si vous n'aimez pas, allez directement au prochain chapitre. Il n'y aura pas d'interro écrite !

D'après la loi de la gravité de Newton, tout objet de l'univers attire tout autre objet avec une force gravitationnelle *proportionnelle au produit de leurs masses et inversement proportionnelle au carré de leur distance*.

$$F = \frac{mMG}{D^2}$$

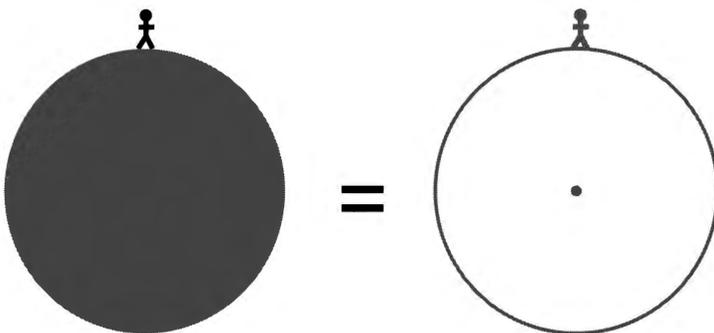
Cette équation est l'une des plus célèbres de la physique, presque aussi célèbre que $E = mc^2$ (la fameuse équation d'Einstein reliant l'énergie, E , à la masse, m , et à la vitesse de la lumière, c). À gauche du signe d'égalité, il y a la force F entre deux masses, comme la Lune et la Terre, ou la Terre et le Soleil. À droite, la plus grande des masses est M et la plus petite m . Par exemple, la masse de la Terre est de 6×10^{24} kilogrammes, celle de la Lune de 7×10^{22} kilogrammes. La distance entre les masses est figurée par D . De la Terre à la Lune, la distance est d'environ 4×10^8 mètres.

Le dernier symbole de l'équation, G , est une constante numérique appelée *constante universelle de gravitation* ou encore *constante de Newton*. Il ne s'agit pas de quelque chose qui s'obtient de façon purement mathématique. Pour déterminer sa valeur, il faut mesurer la force gravitationnelle entre deux masses données placées à une distance donnée. Une fois cela fait, vous serez en mesure de calculer la force qui s'exercera entre deux masses quelconques situées à une distance quelconque. Comble d'ironie, Newton n'a jamais connu la valeur de sa propre constante. Du fait de la faiblesse de la gravité, la valeur de G était trop petite pour

être mesurée jusqu'à la fin du XVIII^e siècle. À ce moment-là, un physicien anglais nommé Henry Cavendish inventa une façon astucieuse de mesurer des forces d'une intensité extrêmement petite. Cavendish trouva que la force qui s'exerçait entre une paire de masses d'un kilogramme séparée d'un mètre est approximativement de $6,7 \times 10^{-11}$ newtons. (Le newton est l'unité de force dans le système métrique. C'est le poids d'une masse d'un dixième de kilogramme.) Ainsi, la valeur de la constante de Newton, dans les unités du système métrique, est :

$$G = 6,7 \times 10^{-11}$$

Newton a eu un coup de chance en mettant au point les conséquences de sa théorie – les propriétés mathématiques particulières de la loi en inverse du carré. Quand vous vous pesez, une partie de la force gravitationnelle qui vous attire vers la Terre provient de la masse qui se trouve juste sous vos pieds, une autre partie provient d'une masse profondément enfouie à l'intérieur de la Terre, une autre provient des antipodes, d'un point à treize mille kilomètres... Mais, grâce à un miracle des mathématiques, vous pouvez faire comme si toute la masse était concentrée en un seul point situé exactement au centre géométrique de la planète.



Dans le cas d'une boule massive, tout se passe exactement comme si toute la masse était concentrée en un seul point au centre de la boule

Ce fait, bien commode, permettait à Newton de calculer la vitesse de libération d'un objet de grande taille en remplaçant la grande masse par un point de toute petite masse. Voici le résultat.

$$\text{Vitesse de libération} = \sqrt{\frac{2MG}{R}}$$

La formule montre clairement que plus grande est la masse et plus petit est le rayon, plus importante sera la vitesse de libération.

C'est maintenant un exercice simple de calculer le rayon de Schwarzschild (R_S). Tout ce qu'il y a à faire est de remplacer la vitesse de libération par celle de la lumière et de transformer la formule pour exprimer le rayon.

$$R_S = \frac{2MG}{c^2}$$

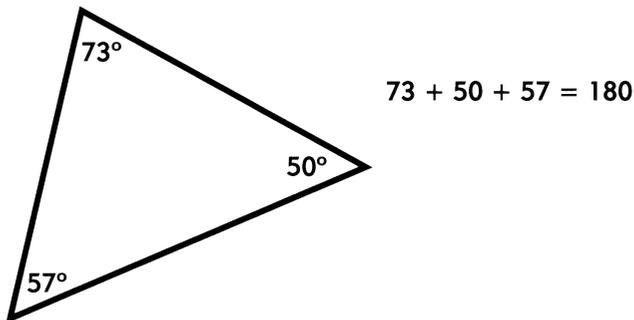
Remarquez le fait, important, que le rayon de Schwarzschild est proportionnel à la masse.

C'est tout ce qu'il y a dire sur les étoiles noires – en tout cas au niveau où Laplace et Michell étaient capables de se situer.

3

Une autre géométrie que celle de grand-papa

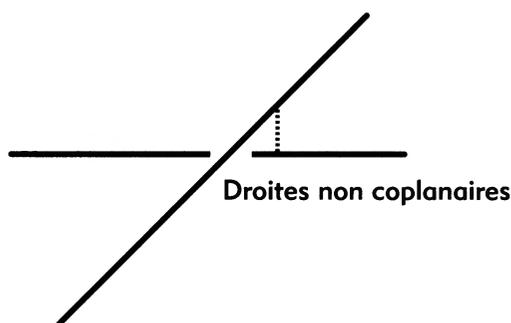
Autrefois, avant que des mathématiciens comme Gauss, Bolyai, Lobatchevski et Riemann¹ n'y sèment la pagaille, géométrie équivalait à géométrie euclidienne – celle-là même que nous avons tous étudiée au collège. D'abord la géométrie plane, celle d'une surface parfaitement plate, à deux dimensions. Les concepts de base étaient les points, les droites, les angles. Nous avons appris que trois points définissent un triangle pour peu qu'ils ne soient pas alignés ; des droites strictement parallèles ne se rencontrent jamais ; et la somme des trois angles d'un triangle est toujours de 180 degrés.



Plus tard, si du moins vous avez suivi un parcours semblable au mien, on étendait votre capacité de visualisation à trois dimensions. Pour certaines choses, c'était pareil qu'en deux dimen-

1. Carl Friedrich Gauss (1777-1855), János Bolyai (1802-1860), Nikolai Lobatchevski (1792-1856) et Georg Friedrich Bernhard Riemann (1826-1866).

sions, mais pour d'autres, cela changeait – sinon, il n'y aurait aucune différence entre deux et trois dimensions. Par exemple, il y a, en trois dimensions, des droites qui ne se rencontrent jamais mais ne sont pas pour autant parallèles : ce sont les droites non coplanaires.

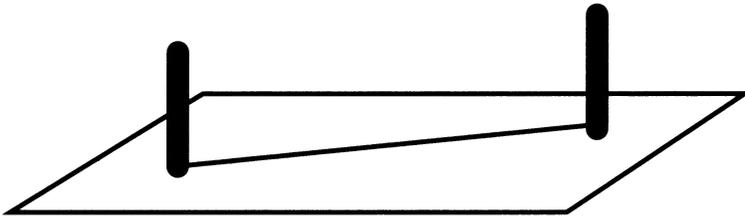


Mais, que l'on soit en deux ou trois dimensions, les règles de géométrie restent celles qu'Euclide a décrites environ trois siècles avant Jésus-Christ. Il est cependant possible de décrire d'autres sortes de géométries – des géométries possédant des axiomes différents –, même en deux dimensions.

Le mot *géométrie* signifie étymologiquement « mesure de la Terre ». Cela aurait été le comble de l'ironie si Euclide s'était en fin de compte inquiété de mesurer des triangles à la surface de la Terre : il aurait découvert que la géométrie euclidienne ne s'appliquait pas ! Cela vient de ce que la surface de la Terre est une sphère¹ et non un plan. En géométrie sphérique, il y a aussi des points et des angles, mais il ne paraît pas évident qu'il y ait quelque chose que nous pourrions appeler ligne droite. Voyons si nous pourrions donner un sens aux mots « ligne droite sur une sphère ».

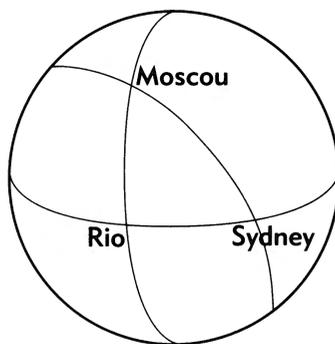
Une façon usuelle de décrire une ligne droite en géométrie euclidienne est de dire que c'est le plus court chemin entre deux points. Si je voulais construire une ligne droite sur un terrain de football, je planterais deux piquets dans le sol et disposerais ensuite une corde entre eux aussi tendue que possible : tendre la corde nous assurerait que la ligne est aussi courte que possible.

1. Bien entendu, je parle ici d'une Terre idéalisée, qui serait parfaitement sphérique.



Cette idée de plus court chemin entre deux points peut facilement être étendue à la sphère. Supposons que notre but soit de déterminer le chemin aérien le plus court possible entre Moscou et Rio de Janeiro. Il nous faut un globe terrestre, deux punaises et de la ficelle. Après avoir piqué les punaises sur Moscou et Rio, nous pouvons tendre la ficelle à la surface du globe pour déterminer la ligne qui fournit le chemin le plus court : les lignes de cette sorte sont appelées *grands cercles*, comme l'équateur et les méridiens. Cela aurait-il un sens de les appeler lignes droites de la géométrie sphérique ? Peu importe comment nous les appelons. Ce qui compte est le lien logique entre points, angles et lignes.

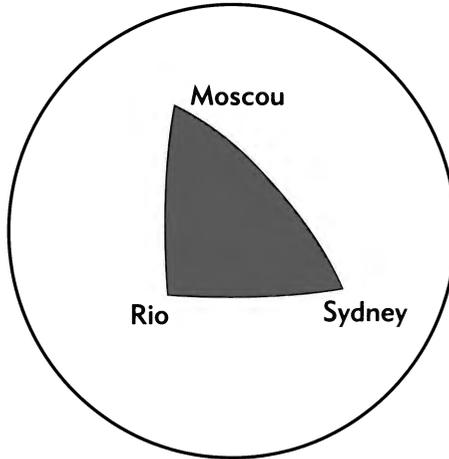
Les plus courts chemins entre deux points : de telles lignes sont, d'une certaine façon, les plus droites possibles sur une sphère. Le nom mathématique correct pour un tel chemin est *géodésique*. De même que les géodésiques du plan sont les segments de droites, les géodésiques sur la sphère sont les arcs de grands cercles.



Grands cercles sur une sphère

Disposant de cet équivalent sphérique des droites, nous pouvons maintenant construire des triangles. Prenons trois points sur la sphère – disons Moscou, Rio et Sydney. Traçons ensuite les trois géodé-

siques reliant ces points deux par deux : Moscou-Rio, Rio-Sydney et, enfin, Sydney-Moscou. Nous obtenons un *triangle sphérique*.

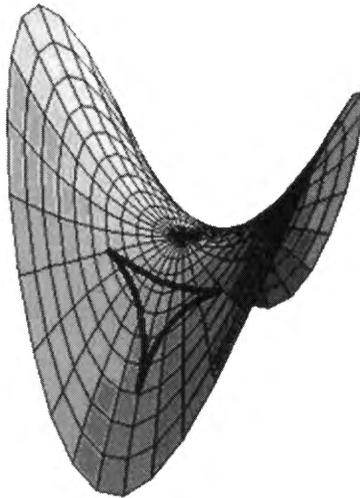


Triangle sphérique

En géométrie plane, la somme des angles de n'importe quel triangle est exactement de 180 degrés. Mais, si l'on regarde attentivement le triangle sphérique, on peut voir que ses côtés s'évasent ce qui rend les angles en quelque sorte plus grands qu'ils ne le seraient sur un plan. Il en résulte que la somme des angles d'un triangle sphérique est toujours plus grande que 180 degrés. Une surface dont les triangles possèdent cette propriété est dite à *courbure positive*.

Se peut-il qu'il y ait des surfaces possédant la propriété opposée – précisément que la somme des angles d'un triangle soit plus petite que 180 degrés ? Une selle est une surface de ce type. Les surfaces en forme de selle sont à *courbure négative* ; au lieu de s'évaser, les géodésiques formant triangle sur une surface à courbure négative sont pincées vers l'intérieur.

Donc, que nos cerveaux limités soient capables ou non de considérer des espaces courbes à trois dimensions, nous savons comment en tester expérimentalement la courbure. Les triangles en sont la clef. On prend trois points quelconques de l'espace, on y attache des ficelles aussi serrées que possible pour former un triangle en trois dimensions. Si la somme des angles fait exactement 180 degrés pour n'importe lequel de ces triangles, l'espace est plat. Sinon, il est courbe.



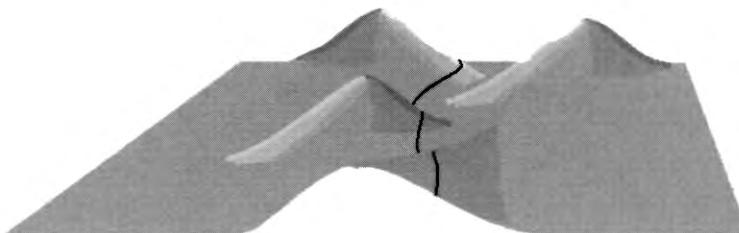
Des géométries bien plus compliquées que sphériques ou en forme de selle peuvent exister – des géométries avec des montagnes irrégulières et des vallées, possédant des régions à courbure positive et négative. Mais la règle pour construire les géodésiques est toujours simple. Imaginez-vous rampant sur une telle surface et allant toujours droit devant, sans jamais tourner la tête. Ne regardez pas autour de vous. Ne vous préoccupez pas de savoir d'où vous venez ni où vous allez. Contentez-vous de ramper comme un myope, droit devant. Votre chemin sera une géodésique.

Imaginons quelqu'un dans un fauteuil roulant motorisé s'attaquant à la traversée d'un désert de dunes de sable. Avec une quantité limitée d'eau, il doit se dépêcher de sortir du désert. Les collines arrondies, les cols en forme de selle et les vallées profondes forment une région de courbure positive et négative et la meilleure façon de conduire la chaise n'est pas du tout évidente. Le conducteur se dit que les hautes collines et les vallées profondes vont le ralentir ; aussi commence-t-il par les contourner. Le mécanisme de conduite est simple : s'il ralentit une des roues par rapport à l'autre, la chaise tournera dans cette direction.

Après quelques heures, notre conducteur commence à soupçonner qu'il repasse par les mêmes paysages que précédemment. Sa façon de conduire la chaise l'a entraîné dans une dangereuse marche aléatoire. Il se rend désormais compte que la meilleure stratégie est d'aller droit devant, sans jamais tourner ni à droite ni

à gauche. « Droit devant ! » se répète-t-il. Mais comment être sûr qu'il n'oscille pas quand même ?

La réponse lui apparaît bientôt, évidente : la chaise roulante dispose d'un mécanisme qui rend les deux roues solidaires en sorte qu'elles tournent ensemble comme des haltères. Il bloque les roues de cette manière et se lance, fonçant tout droit au bord du désert.



Sur chaque point de la trajectoire, le voyageur semble aller en ligne droite. Mais, quand on la regarde dans son ensemble, le chemin qu'elle suit est une courbe compliquée et sinueuse. Pourtant, elle est aussi droite et courte que possible.

Ce n'est qu'au XIX^e siècle que des mathématiciens ont commencé à étudier de nouvelles sortes de géométries basées sur d'autres systèmes d'axiomes. Quelques-uns, comme Georg Friedrich Bernhard Riemann, ont considéré l'idée que la géométrie « réelle » – celle de l'espace réel – pourrait bien ne pas être tout à fait euclidienne. Mais Einstein fut le premier à prendre l'idée vraiment au sérieux. Dans la théorie de la relativité générale, la géométrie de l'espace (ou, plus exactement, de l'espace-temps) est devenue un problème pour expérimentateurs, pas pour philosophes ou même mathématiciens. Les mathématiciens peuvent nous dire quelles sortes de géométrie sont possibles, mais ce n'est que par des mesures qu'on peut déterminer la « véritable » géométrie de l'espace.

En travaillant sur la théorie de la relativité générale, Einstein a complété le travail mathématique de Riemann qui avait envisagé des géométries au-delà de celles des sphères et des selles : des espaces à trous et bosses ; avec des lieux à courbure positive et d'autres à courbure négative ; des géodésiques sinuant au milieu et

par-dessus tout cela en des chemins courbes et irréguliers. Riemann n'imaginait qu'un espace tridimensionnel, mais Einstein et son contemporain Hermann Minkowski ont introduit une nouveauté : le temps vu comme *quatrième dimension*. (Essayez de visualiser cela : si vous y parvenez, vous avez un cerveau vraiment pas comme les autres !)

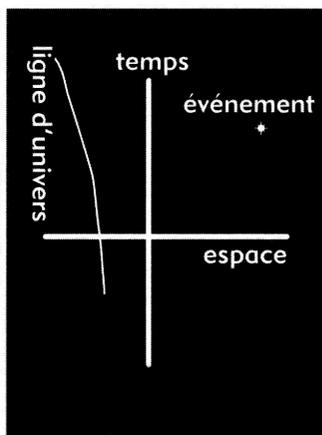
La théorie de la relativité restreinte

Avant même qu'Einstein ne commence à penser à des espaces courbes, Minkowski eut l'idée que temps et espace devaient être combinés pour former l'*espace-temps* à quatre dimensions, expliquant de façon assez élégante, bien qu'un peu pompeuse : « Désormais, l'espace en soi et le temps en soi sont condamnés à s'évanouir comme des ombres et ce n'est que par une sorte d'union des deux que pourra être préservée une réalité indépendante¹. » Le modèle de Minkowski d'espace-temps, plat ou courbe, a pris le nom d'espace de Minkowski.

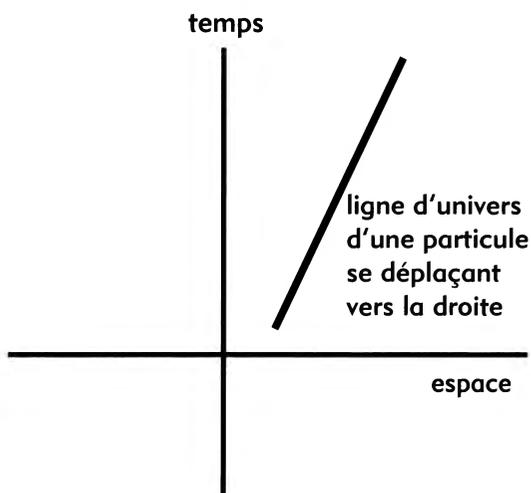
Dans sa conférence de 1908 lors de la 80^e assemblée des physiciens et scientifiques allemands, Minkowski représenta le temps sur l'axe vertical, se contentant du simple axe horizontal pour représenter les trois dimensions de l'espace. Les auditeurs étaient supposés faire preuve d'un peu d'imagination.

Minkowski appela les points de l'espace-temps *événements*. L'usage qu'on fait d'ordinaire de ce mot suppose non seulement une heure et un lieu mais aussi que quelque chose se passe. Par exemple : « Un événement d'une importance capitale s'est produit le 16 juillet 1945 à 5 h 29 mn 45 s à Trinity, au Nouveau-Mexique, lors du premier essai d'une bombe atomique. » Chez Minkowski, le mot événement est moins chargé de sens et signifie simplement une heure et un lieu, indépendamment du fait qu'il s'y soit, en fin de compte, passé quelque chose ou non. Ce qu'il voulait vraiment dire était *un lieu et une heure où un événement pourrait ou non se produire*, mais ça faisait un peu compliqué et il s'est donc contenté d'événement.

1. Minkowski a été le premier à se rendre compte qu'une nouvelle géométrie à quatre dimensions était le cadre approprié pour la théorie de la relativité restreinte d'Einstein. La citation est tirée de « Espace et temps », une conférence faite lors de la 80^e assemblée des physiciens et scientifiques allemands le 21 septembre 1908.

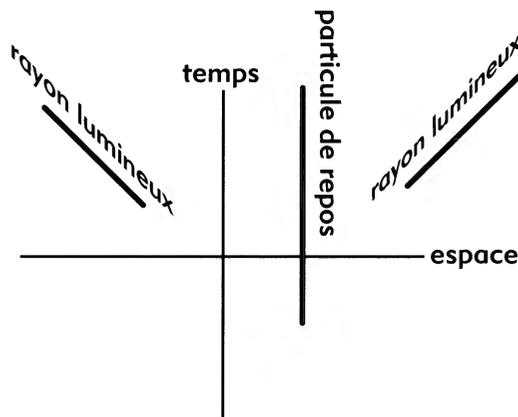


Les lignes ou les courbes de l'espace-temps jouent un rôle particulier dans l'œuvre de Minkowski. Un point de l'espace représente la position d'une particule. Mais, pour représenter le mouvement d'une particule à travers l'espace-temps, on trace une ligne, ou une courbe, balayant une trajectoire appelée *ligne d'univers*. On ne peut éviter une espèce de mouvement : même si une particule reste parfaitement immobile, elle se déplace néanmoins dans le temps. La trajectoire d'une telle particule immobile serait une droite verticale. Celle d'une particule se déplaçant vers la droite serait une ligne d'univers inclinée vers la droite.



De même, une ligne d'univers inclinée vers la gauche représenterait une particule se déplaçant vers la gauche. Plus l'inclinaison est grande par rapport à la verticale, plus grande est la vitesse de la particule en mouvement. Minkowski a représenté le mouvement des rayons lumineux – les plus rapides de tous les objets – par des lignes inclinées à 45° par rapport à la verticale.

Minkowski a qualifié la ligne d'univers d'une particule se déplaçant plus lentement que la lumière de *genre temps* du fait qu'elle est proche de la verticale ; les trajectoires des rayons lumineux inclinées à 45° étant du *genre lumière*.



Temps propre

Le concept de distance est relativement facile à saisir pour l'esprit humain. Tout particulièrement quand la distance est mesurée le long d'une ligne droite. Pour cela, une règle graduée ordinaire est tout ce dont vous avez besoin. Mesurer les distances le long d'une courbe est un peu plus difficile, mais pas trop. Il suffit de remplacer la règle par un ruban souple gradué. Mais la mesure des distances dans l'espace-temps est plus subtile et la façon de faire ne saute pas aux yeux. En fait, un tel concept n'existait pas jusqu'à ce qu'il fût inventé par Minkowski.

Minkowski cherchait tout particulièrement à définir un concept de distance le long d'une ligne d'univers. Prenons, par exemple, la ligne d'univers d'une particule au repos. La trajectoire ne comportant aucun déplacement dans l'espace, une règle ou un ruban gradué ne paraît pas être le bon instrument. Mais, comme Min-

kowski s'en est rendu compte, même un objet parfaitement immobile se déplace dans le temps. La bonne façon de mesurer son déplacement n'est pas d'utiliser une règle mais une horloge. Il a appelé cette nouvelle mesure de la distance le long d'une ligne d'univers *temps propre*.

Il faut imaginer que chaque objet transporte une petite horloge, où qu'il aille, exactement comme quelqu'un équipé d'une montre-gousset. Le temps propre qui sépare deux événements le long d'une ligne d'univers est la durée qui s'est écoulée entre ces deux événements telle qu'elle est mesurée par l'horloge qui se déplace le long de cette ligne d'univers. Les tic-tac de l'horloge sont l'équivalent des graduations du ruban mais, au lieu de mesurer une distance ordinaire, ils mesurent le temps propre de Minkowski.

Un exemple concret. M. Tortue et M. Lièvre décident de faire la course à travers Central Park. Les arbitres se tiennent à chaque extrémité et disposent d'horloges soigneusement synchronisées afin de chronométrer la compétition. Les coureurs s'élancent à midi pile et, à mi-chemin, M. Lièvre est tellement en avance qu'il décide de faire un petit somme avant de continuer. Mais il dort trop longtemps et s'éveille juste à temps pour voir M. Tortue s'approcher de la ligne d'arrivée. Désespéré à l'idée de perdre la course, M. Lièvre part comme l'éclair et parvient à rattraper M. Tortue juste sur la ligne d'arrivée.

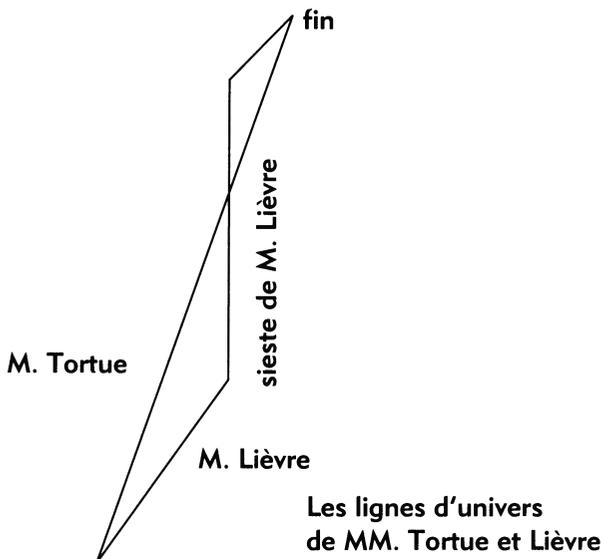
M. Tortue sort de sa poche la montre de précision et fait voir à la foule amassée que le temps propre, le long du segment de sa ligne d'univers qui va du début à la fin de la course est 2 heures et 56 minutes. Mais pourquoi employer ce nouveau terme de *temps propre* ? Pourquoi M. Tortue ne se contente-t-il pas de dire qu'il s'est écoulé 2 heures et 56 minutes entre le départ et l'arrivée ? Le temps n'est-il pas tout simplement le temps ?

Newton le pensait certainement. Il croyait que Dieu disposait d'une grande horloge définissant un écoulement du temps universel sur lequel toutes les horloges devaient se synchroniser. Regardez le temps universel de Newton en imaginant que l'espace est rempli de petites horloges qui ont été synchronisées. Toutes ces horloges sont de bonnes et honnêtes horloges qui fonctionnent exactement au même rythme et qui, une fois synchronisées, le restent. Où qu'il se trouve, M. Tortue ou M. Lièvre peut savoir l'heure qu'il est en regardant l'horloge qui se trouve à proximité immédiate. Ou regarder sa propre montre dans son gousset. Pour Newton, c'était

là un axiome : où que vous vous déplaçiez, à quelque vitesse que ce soit, en ligne droite ou le long d'une courbe, la montre dans votre gousset – en supposant qu'il s'agisse aussi d'une bonne et honnête montre – sera en accord avec les horloges du voisinage. Le temps newtonien est absolu, il n'a rien de relatif.

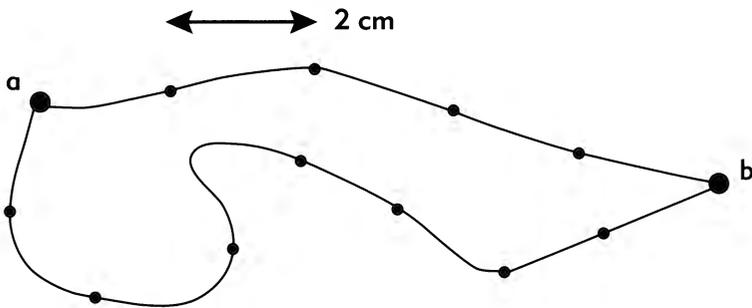
Mais, en 1905, Einstein a fichu en l'air le temps absolu de Newton. D'après la théorie de la relativité restreinte, le tic-tac des horloges dépend de la façon dont elles se déplacent, quand bien même elles sont les exactes répliques les unes des autres. Dans des situations ordinaires, les effets sont insignifiants mais, lorsque les horloges se déplacent à des vitesses proches de celle de la lumière, cela devient tout à fait perceptible. D'après Einstein, chaque horloge qui se déplace le long de sa propre ligne d'univers possède un rythme qui lui est propre. C'est ainsi que Minkowski a été conduit à définir le concept nouveau de temps propre.

Simplement à titre d'exemple, quand M. Lièvre sort sa propre montre (elle aussi une bonne et honnête montre), le temps propre de sa ligne d'univers indique 1 heure et 36 minutes¹. Bien qu'elles commencent et finissent aux mêmes points de l'espace-temps, les lignes d'univers de MM. Tortue et Lièvre ont des temps propres plutôt différents.



1. Il s'agit là d'une énorme exagération : il aurait fallu pour cela que M. Lièvre se soit déplacé à une vitesse proche de celle de la lumière.

Avant d'aller plus avant sur cette question du temps propre, il sera intéressant de s'arrêter un peu plus sur les distances ordinaires mesurées le long d'une courbe à l'aide d'un ruban gradué. Considérons deux points quelconques de l'espace et traçons une courbe qui les relie. Quelle distance y a-t-il entre ces deux points en la mesurant le long de la courbe ? À l'évidence, la réponse dépend de la courbe. En voici deux reliant les mêmes points (a et b) qui ont des longueurs assez différentes. Le long de celle du haut, la distance entre a et b est d'environ 10 cm ; le long de celle du bas, elle est d'environ 16 cm.

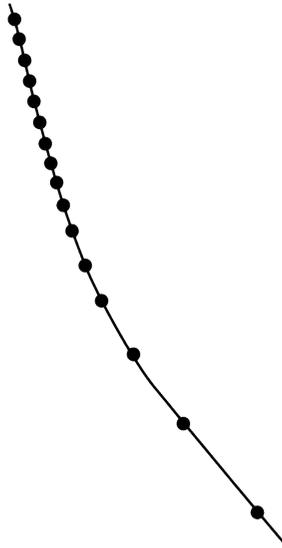


Bien entendu, il n'y a absolument rien de surprenant au fait que des courbes différentes entre a et b ont des longueurs différentes.

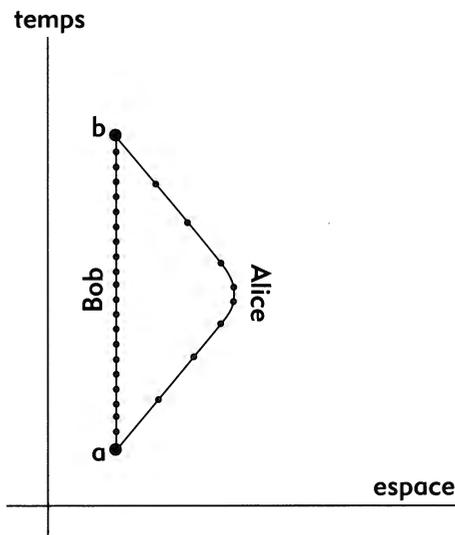
Revenons à la question de la mesure des lignes d'univers de l'espace-temps. Voici, ci-contre, une représentation d'une ligne d'univers ordinaire. Remarquez que la ligne d'univers s'incurve. Cela signifie que la vitesse le long de la trajectoire n'est pas uniforme. Dans cet exemple, on voit le ralentissement d'une particule se déplaçant rapidement¹. Les points indiquent les battements de l'horloge : chaque intervalle représente une seconde.

Remarquez que le tic-tac des secondes semble plus lent quand l'inclinaison est plus proche de l'horizontale. Il ne s'agit pas d'une erreur mais correspond à la fameuse découverte par Einstein de la *dilatation du temps* : des horloges se déplaçant rapidement ont un rythme plus lent que celui d'horloges se déplaçant plus lentement ou au repos.

1. Le mouvement dans l'espace-temps doit être vu en suivant la ligne d'univers de bas en haut. Le fait que le mouvement de la particule soit ralenti se voit à l'inclinaison qui se rapproche de la verticale, celle-ci représentant l'« immobilité » dans l'espace usuel (le déplacement n'a lieu que dans le temps). (*N.d.T.*)



Considérons deux lignes d'univers courbées reliant deux événements. Einstein – toujours l'homme des expériences de pensée – a imaginé deux jumeaux – appelons-les Alice et Bob –, nés au même instant. Désignons par a l'événement de leur naissance. À l'instant de leur naissance, les jumeaux sont séparés ; Bob est emmené à la maison tandis qu'Alice est expédiée ailleurs à une vitesse formidable. Après un moment, Einstein fait faire demi-tour à Alice et la rapatrie à la maison. En fin de compte, Bob et Alice se retrouvent à nouveau en b .



À leur naissance, Einstein a donné aux jumeaux des montres de poche identiques, parfaitement synchronisées. Quand Bob et Alice finissent par se retrouver en b , ils comparent leurs montres et découvrent quelque chose qui aurait surpris Newton. Tout d'abord, Bob a une longue barbe grise tandis qu'Alice est l'image même de la jeunesse. À en croire leurs montres de poche, le temps propre d'Alice le long de sa ligne d'univers est bien moins grand que celui de Bob. De même que la distance ordinaire entre deux points dépend de la courbe qui les relie, le temps propre entre deux événements dépend de la ligne d'univers qui les relie.

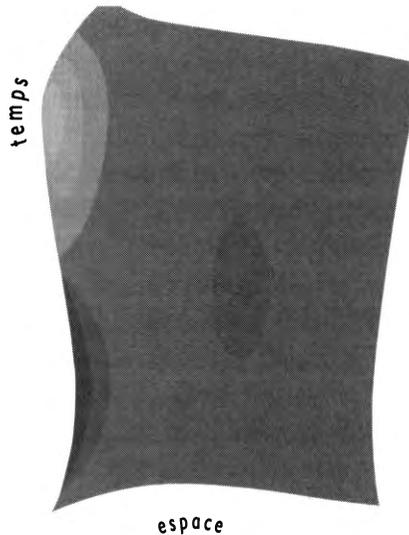
Alice a-t-elle remarqué que sa montre avait un rythme lent pendant son voyage ? Pas du tout ! Il n'y avait pas que sa montre qui allait lentement : il en a été de même de son rythme cardiaque, de ses fonctions cérébrales et de tout son métabolisme. Pendant son voyage, Alice n'avait rien qui lui permette de mettre sa montre en comparaison mais, quand elle a enfin rencontré Bob pour la deuxième fois, elle a découvert qu'elle était sensiblement plus jeune que lui. Le « paradoxe des jumeaux » a laissé perplexe les étudiants en physique depuis plus d'un siècle.

Il y a un phénomène curieux que vous avez peut-être découvert par vous-même : Bob se déplace dans l'espace-temps en ligne droite tandis qu'Alice se déplace sur une trajectoire courbe. Cependant, c'est le temps propre en suivant la trajectoire d'Alice qui est plus court que celui qui suit celle de Bob. C'est là un exemple des phénomènes contre-intuitifs que l'on rencontre dans la géométrie de l'espace de Minkowski : une ligne d'univers droite entre deux événements possède le temps propre *le plus long*. Rajoutez cela à votre kit de reprogrammation.

La théorie de la relativité générale

Comme Riemann, Einstein pensait que la géométrie (non seulement de l'espace mais aussi de l'espace-temps) était courbée et variable. Il ne décrivait pas seulement l'espace mais la géométrie de l'espace-temps. Dans la foulée de Minkowski, Einstein a représenté le temps sur un axe et, sur l'autre, les trois dimensions de l'espace toutes ensemble. Mais, au lieu de représenter l'espace-temps par une surface plane, il a imaginé que la surface était voilée, repliée avec des renflements, des bosses. Les particules se

déplaçaient toujours le long de lignes d'univers et les horloges égrenaient le temps propre, mais la géométrie de l'espace-temps était bien plus irrégulière.



Les lois d'Einstein

De façon surprenante, les lois de la physique sont, de bien des manières, plus simples dans l'espace-temps courbé que dans la physique de Newton. Prenons, par exemple, le mouvement des particules. Les lois de Newton commencent par le principe d'inertie :

En l'absence de forces, tout objet conserve un mouvement uniforme.

Cette règle d'apparence simple cache en fait deux idées distinctes derrière l'expression « mouvement uniforme ». Tout d'abord, mouvement uniforme signifie mouvement en ligne droite dans l'espace. Mais Newton entendait par là quelque chose de plus fort : mouvement uniforme implique aussi que la vitesse ne varie pas, est constante – autrement dit qu'il n'y a pas d'accélération¹.

Qu'en est-il des forces de gravité ? Newton a ajouté une deuxième loi – une loi sur un mouvement non uniforme – qui dit

1. Le terme *accélération* renvoie à toute modification de la vitesse, y compris le ralentissement que nous appelons d'ordinaire décélération. En physique, la décélération est simplement une accélération négative.

qu'une force est le produit d'une masse par une accélération, autrement dit :

L'accélération d'un objet est le résultat de la division de la force exercée sur l'objet par sa masse.

Une troisième règle intervient quand la force est due à la gravité :

La force de gravité exercée sur tout objet est proportionnelle à la masse de ce dernier.

Minkowski a simplifié la conception de Newton du mouvement uniforme avec une idée astucieuse qui résume les deux conditions :

En l'absence de force, tout objet se déplace dans l'espace-temps en suivant une ligne d'univers rectiligne.

Le fait que la ligne d'univers soit droite implique non seulement que la trajectoire dans l'espace est rectiligne mais aussi que la vitesse est constante.

L'hypothèse de Minkowski d'une ligne d'univers droite était une synthèse élégante des deux aspects du mouvement uniforme, mais elle ne s'appliquait qu'en l'absence totale de forces. Einstein a repris l'idée de Minkowski à un autre niveau en l'appliquant à un espace-temps courbe.

La nouvelle loi du mouvement d'Einstein était d'une simplicité remarquable. En tout point de sa ligne d'univers, une particule agit de la façon la plus simple possible : elle va droit devant (dans l'espace-temps). Si l'espace-temps est plat, la loi d'Einstein est la même que celle de Minkowski mais, s'il est courbé – dans des zones où des corps massifs le déforment et le voilent –, la nouvelle loi impose aux particules de se déplacer le long de ses géodésiques.

Ainsi que Minkowski l'a expliqué, une ligne d'univers courbée, indique qu'un objet est soumis à une force. D'après la nouvelle loi d'Einstein, les particules dans un espace-temps courbe se déplacent aussi droit qu'elles le peuvent, mais les géodésiques s'incurvent et se penchent inévitablement pour s'ajuster au relief local de l'espace-temps. Les équations mathématiques d'Einstein montrent qu'une géodésique dans un espace-temps courbe se comporte exactement comme les lignes d'univers courbes d'une particule en mouvement dans un champ gravitationnel. Une force gravitationnelle n'est alors rien d'autre que la courbure d'une géodésique dans l'espace-temps courbe.

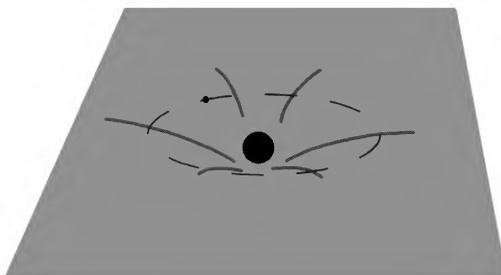
En une seule loi d'une simplicité presque ridicule, Einstein a combiné les lois du mouvement de Newton et l'hypothèse des

lignes d'univers de Minkowski, expliquant de quelle façon la gravité agit sur tous les objets. Les forces de gravité représentaient, pour Newton, un fait naturel inexpliqué ; Einstein en a fait une simple conséquence de la géométrie non euclidienne de l'espace-temps.

Le principe postulant que les particules se déplacent le long de géodésiques a apporté une nouvelle et puissante façon de voir la gravité. Mais il ne disait rien des *causes* de la courbure. Pour compléter sa théorie, Einstein devait encore expliquer ce qui contrôle les renflements et autres torsions et irrégularités de l'espace-temps. Dans la vieille théorie newtonienne, à l'origine d'un champ gravitationnel, il y a une masse : une masse telle que celle du Soleil crée un champ autour d'elle ce qui, en retour, agit sur le mouvement des planètes. Il était par conséquent naturel pour Einstein de conjecturer que la présence d'une masse – ou, de façon équivalente, d'énergie – déformait ou recourbait l'espace-temps. John Wheeler, un des grands pionniers et vulgarisateurs de la théorie moderne de la relativité, a résumé cela en un slogan concis : « L'espace dicte aux corps la façon de se mouvoir tandis que les corps dictent à l'espace la façon de se recourber. » (Il parlait de l'espace-temps.)

L'idée nouvelle d'Einstein signifiait que l'espace-temps n'était pas passif : certaines de ses propriétés, comme la courbure, étaient une réaction à la présence de masses. Presque comme si l'espace-temps était fait d'une texture élastique, voire fluide, susceptible d'être affectée par les objets qui le traversent.

Le lien entre objets massifs, gravité, courbure et mouvement des particules est parfois décrit par une analogie pour laquelle j'ai des sentiments mitigés. L'idée générale est d'imaginer l'espace comme une pièce élastique horizontale, un peu comme un trampoline. Quand il n'y a aucune masse pour la déformer, la pièce reste plate. Mais, si vous mettez dessus une masse lourde, comme une boule de pétanque, le poids de celle-ci la déformera. Ajoutez une masse plus petite – une bille fera l'affaire – et observez la bille tomber sur la boule plus lourde. On peut aussi donner à la bille une vitesse tangentielle de façon qu'elle tourne autour de la masse plus lourde, tout à fait comme la Terre tourne autour du Soleil. Le creux sur la surface empêche la masse plus petite de s'échapper, exactement comme la gravité du Soleil retient la Terre.



Dans cette analogie, plusieurs aspects sont trompeurs. Tout d'abord, la courbure de la pièce élastique est une courbure de l'espace et non de l'espace-temps. Elle ne permet pas d'expliquer les effets particuliers qu'ont les masses sur les horloges voisines (nous verrons ces effets plus loin dans ce chapitre). Mais le pire est que ce modèle utilise la gravité pour expliquer la gravité : c'est l'attraction de la véritable Terre sur la boule de pétanque qui engendre la dépression à la surface de la pièce élastique. De quelque façon qu'on le prenne techniquement, le modèle de la pièce élastique est complètement faux.

Malgré tout, cette analogie reflète un peu l'idée contenue dans la relativité générale. L'espace-temps est déformable, et des masses pesantes le déforment effectivement. Le mouvement de petits objets est influencé par la courbure créée par les objets lourds. Le creux de la pièce élastique ressemble énormément aux diagrammes mathématiques de plongement dont je vais bientôt donner l'explication. Vous pouvez utiliser l'analogie si elle vous aide, mais rappelez-vous que ce n'est qu'une analogie.

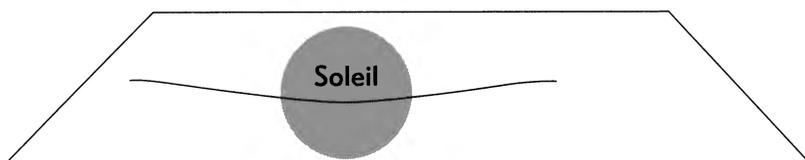
Trous noirs

Coupez une pomme en rondelles transversalement. La pomme est en trois dimensions mais chaque coupe transversale qu'on vient d'obtenir est en deux dimensions. Si vous empilez toutes les coupes transversales obtenues dans la découpe, vous reconstruisez la pomme. On peut dire que chaque fine tranche est plongée dans la pile de rondelles de dimension supérieure.

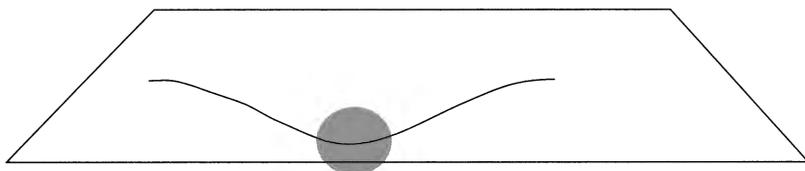


L'espace-temps est à quatre dimensions mais, en le coupant en rondelles, nous pouvons mettre en évidence des rondelles d'espaces à trois dimensions. On peut le voir comme un empilement de rondelles fines, chacune représentant un espace à trois dimensions à un instant donné. Se représenter trois dimensions est bien plus simple que quatre. Les représentations des rondelles sont appelées diagrammes de plongement et nous aident à avoir une vision plus intuitive des géométries courbes.

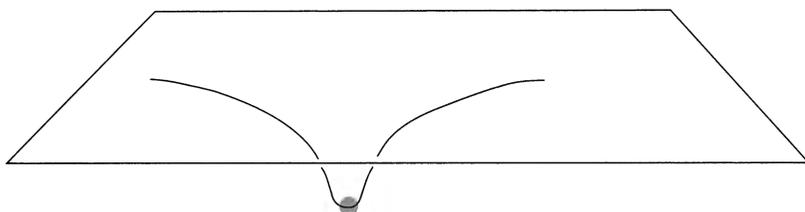
Prenons le cas de la géométrie créée par la masse du Soleil. Oublions le temps et efforçons-nous de nous représenter la courbure de l'espace au voisinage du Soleil. Le diagramme de plongement ressemble à une dépression en pente douce dans une pièce élastique, avec le Soleil au centre, un peu comme la boule de pétanque sur le trampoline.



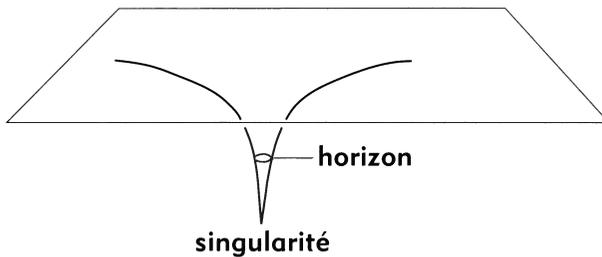
La déformation autour du Soleil serait plus prononcée si la même masse était concentrée dans un volume plus faible.



La courbure au voisinage d'une naine blanche ou d'une étoile à neutrons est encore plus accentuée, mais toujours lisse.



Comme nous l'avons déjà vu, si l'étoile en train de s'effondrer devient suffisamment petite pour se retrouver à l'intérieur de son rayon de Schwarzschild (trois kilomètres environ pour le Soleil), alors, exactement comme les têtards étaient aspirés dans le drain, les particules du Soleil seraient irrésistiblement attirées à l'intérieur, s'effondrant jusqu'à former une singularité – un point de courbure infinie¹.



Ce que ne sont pas les trous noirs

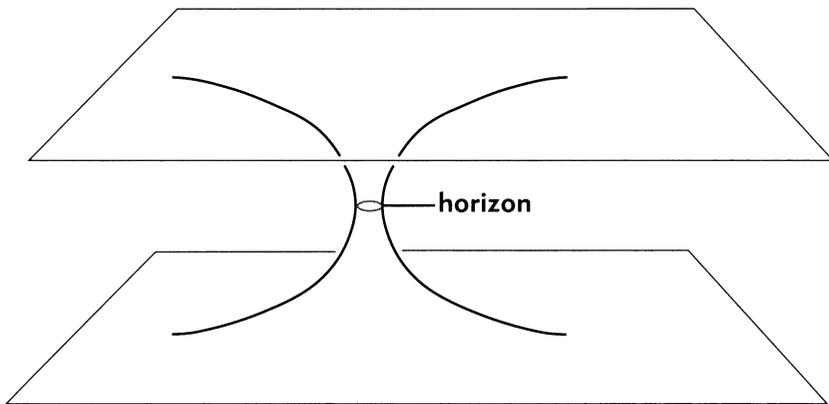
Avec ce qui suit, je m'attends à recevoir des courriels furieux de la part de lecteurs dont la connaissance des trous noirs ne vient que du film de Disney : *Le Trou noir*². Je ne voudrais pas être rabat-joie – Dieu sait que les trous noirs sont des objets fascinants – mais nous ne sommes pas là devant des portes ouvrant sur le paradis, l'enfer ou d'autres univers, ni des tunnels ramenant à notre propre univers. Tout est permis en amour, à la guerre et dans la science-fiction ; je ne me formalise donc pas vraiment que des scénaristes aient décidé de planer un peu au pays des songes... Mais comprendre ce qu'est un trou noir nécessite plus qu'une étude attentive de films de série B.

Le point de départ du film *Le Trou noir* vient du travail d'Einstein et de son collaborateur Nathan Rosen, vulgarisé plus tard par John Wheeler : Einstein et Rosen ont émis l'hypothèse que l'intérieur d'un trou noir permettrait de relier un endroit situé à une très grande distance à travers ce que Wheeler appellera plus

1. Note à l'attention des spécialistes : le diagramme de plongement qui suit cette explication n'est pas construit en temps de Schwarzschild constant. Il a été obtenu en utilisant des coordonnées de Kruskal en prenant la surface $T = 1$.

2. *Le Trou noir* est un film des studios Disney réalisé en 1978 par Gary Nelson : un vaisseau spatial retrouve la trace d'un autre vaisseau disparu depuis vingt ans et stationnant au bord d'un trou noir. (*N.d.T.*)

tard un *trou de ver*. L'idée générale était que les horizons de deux trous noirs – peut-être distants l'un de l'autre de milliards d'années-lumière – pourraient être reliés, créant ainsi un raccourci fabuleux à travers l'univers. Le diagramme de plongement d'un trou noir, plutôt que de se terminer par une singularité acérée, s'ouvrirait, une fois l'horizon franchi, sur une vaste région nouvelle de l'espace-temps.



Pont d'Einstein-Rosen

Entrer par un bout et ressortir par l'autre serait comme pénétrer dans un tunnel à New York et ressortir, après quelques kilomètres à peine, à Pékin ou même sur Mars. Le trou de ver de Wheeler s'appuyait sur d'authentiques solutions mathématiques de la théorie de la relativité générale.

Telle est l'origine de la légende selon laquelle les trous noirs sont des tunnels ouvrant sur d'autres mondes. Il y a deux erreurs dans ce mythe. La première est que le trou de ver de Wheeler ne peut rester ouvert qu'un très court instant, après quoi il s'évanouit. Un trou de ver s'ouvre et se referme si vite qu'il est impossible que quoi que ce soit s'y infiltre, pas même la lumière. C'est un peu comme si le tunnel pour Pékin se refermait avant que quiconque puisse y passer. Certains physiciens ont avancé que la mécanique quantique pourrait d'une certaine manière stabiliser les trous de ver, mais cela n'a rien d'évident.

Qui plus est, Einstein et Rosen travaillaient sur un « trou noir éternel » – c'est-à-dire existant non seulement pour l'éternité mais depuis toute éternité. Or l'univers lui-même n'est pas infiniment

vieux. Les trous noirs du réel proviennent presque à coup sûr de l'effondrement d'étoiles (ou d'autres objets massifs) bien après le Big Bang. Quand on applique les équations d'Einstein à la formation d'un trou noir, on ne lui trouve tout simplement pas de trou de ver. Le diagramme de plongement ressemble à celui de la page 72.

Maintenant que je vous ai bien gâché la journée, il ne vous reste plus qu'à louer le film et passer un bon moment...

Comment construire une machine à voyager dans le temps

L'avenir n'est plus ce qu'il était.

YOGI BERRA¹

Qu'en est-il des machines à voyager dans le temps, cet autre gadget classique de la science-fiction à l'origine de nombre de livres, films et téléfilms ? Personnellement, j'aimerais bien en avoir une ! Je serais très curieux de savoir à quoi ressemblera le futur. Serons-nous toujours là dans un million d'années ? Allons-nous coloniser l'espace ? Le sexe restera-t-il la méthode préférée de procréation ? J'adorerais le savoir – vous aussi, je suppose.

Mais cette aspiration n'est pas sans danger ! Car il y aurait quelques inconvénients à voyager dans le futur. Tous vos amis, votre famille seraient morts depuis longtemps. Vos vêtements paraîtraient ridicules. Votre langue serait surannée. Bref, vous seriez une bête curieuse. Un aller simple pour le futur, sans être une tragédie, aurait un côté sinistre.

Pas de souci : remontez dans votre machine et réglez le cadran sur retour dans le présent. Mais que feriez-vous si votre machine ne savait pas faire marche arrière, si vous ne pouviez qu'aller de l'avant ? Iriez-vous quand même ? Vous pensez peut-être qu'il s'agit là d'une question vaine, tout le monde sachant très bien que les machines à voyager dans le temps relèvent de la science-fiction ? Eh bien, pas du tout...

1. Joueur mythique de base-ball jusqu'en 1963 dans l'équipe des Yankees de New York, Peter Lawrence Berra, dit Yogi Berra, a retrouvé, après sa retraite, une grande popularité auprès du public américain pour ses aphorismes – ou ceux qu'on lui prête –, les « yogismes », tel celui cité ici. (*N.d.T.*)

Les machines à voyager uniquement dans le futur sont tout à fait possibles, au moins en principe. Dans le film de Woody Allen *Woody et les robots*, le héros est transporté deux cents ans plus tard par une technique qui est presque réalisable aujourd'hui. Il s'est simplement cryogénisé lui-même, sa vie restant en suspension – ce qui a déjà été fait sur des chiens et des porcs pendant quelques heures. Quand il se réveille de son état congelé, il est dans le futur.

Il est vrai que cette technique n'est pas vraiment une machine à voyager dans le temps. Elle peut ralentir le métabolisme d'une personne, pas celui des atomes et autres processus physiques. Mais on peut faire mieux. Rappelez-vous nos deux jumeaux, Bob et Alice, séparés à la naissance. Quand Alice rentre de voyage, elle retrouve un monde qui a vieilli bien plus qu'elle : un aller-retour dans l'espace à bord d'un vaisseau très rapide est un exemple de voyage dans le temps.

Un vaste trou noir serait aussi une machine à voyager dans le temps très pratique. Cela fonctionnerait ainsi : tout d'abord, il vous faudrait une station spatiale en orbite autour de lui et un grand câble pour vous descendre au voisinage de son horizon. Il ne faudrait pas s'approcher trop près ; pas question non plus de traverser l'horizon : il faut donc que le câble soit très solide. Un treuil sur la station spatiale permettrait de le dérouler pour vous descendre puis, après une durée bien précise, de l'enrouler pour vous remonter.

Supposons que vous vouliez vous projeter mille ans dans le futur et que vous soyez prêt à rester suspendu au câble pendant un an mais sans ressentir trop d'inconfort du fait de l'accélération de la pesanteur. C'est possible, à condition de trouver un trou noir dont l'horizon aurait à peu près la taille de notre galaxie. Si une situation inconfortable ne vous dérange pas, on peut aussi y arriver avec le trou noir bien plus petit qui se trouve au centre de notre galaxie. L'inconvénient serait que vous ressentirez un poids de cinq millions de tonnes durant cette année passée près de l'horizon. Mais après un an au bout du câble, le retour vous ferait découvrir qu'un millénaire est passé. En principe au moins, les trous noirs sont vraiment des machines à voyager vers le futur.

Le retour ? Pour cela, il vous faudrait une machine à remonter le temps. Hélas ! Remonter le temps est probablement impossible. Il arrive que des physiciens évoquent la possibilité de le faire en empruntant des trous de ver quantiques, mais remonter le temps conduit toujours à des contradictions logiques. Mon sentiment est que vous resteriez planté dans le futur sans rien pouvoir y faire.

Ralentissement gravitationnel des horloges

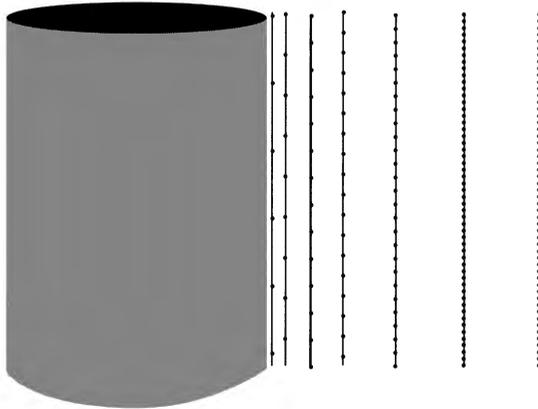
Qu'est-ce qui fait d'un trou noir une machine à voyager dans le temps ? La forte distorsion de la géométrie de l'espace-temps qu'il crée. C'est celle-ci qui affecte l'écoulement du temps propre le long des lignes d'univers de diverses façons selon l'endroit où elles se trouvent. Loin d'un trou noir, cette influence est très faible : l'écoulement du temps propre n'est presque pas modifié par sa présence. Mais une horloge suspendue par un câble juste au-dessus de l'horizon serait sérieusement ralentie par la distorsion de l'espace-temps. Cela serait vrai de toute horloge, y compris votre battement cardiaque, votre métabolisme, jusqu'au mouvement interne des atomes. Vous ne le ressentiriez pas le moins du monde mais, à votre retour dans la station spatiale, la comparaison entre votre horloge et celles restées à bord ferait ressortir l'écart : plus de temps se serait écoulé à bord de la station que ce qu'indiquerait votre horloge.

En fait, il ne serait même pas nécessaire de retourner dans la station spatiale pour ressentir les effets du trou noir sur le temps. Si vous et moi, l'un suspendu près de l'horizon l'autre à bord de la station, pouvions nous observer au télescope, je vous verrais, vous et votre horloge, évoluer très lentement tandis que, de votre côté, vous me verriez m'agiter à toute vitesse comme dans un vieux film des Keystone Kops¹. Ce ralentissement relatif du temps près d'une masse lourde est appelé *décalage gravitationnel vers le rouge*. Ce phénomène a été découvert par Einstein comme conséquence de la théorie de la relativité générale. Il ne se produit pas dans la théorie newtonienne de la gravitation où toutes les horloges marquent un même écoulement du temps.

L'image de l'espace-temps ci-contre représente le décalage gravitationnel vers le rouge près de l'horizon d'un trou noir. L'objet de gauche représente le trou noir. Rappelez-vous qu'il s'agit d'une représentation de l'espace-temps, où l'axe vertical figure le temps. La surface grise représente l'horizon et les lignes verticales placées à différentes distances de l'horizon figurent un groupe d'horloges stationnaires identiques. Les tic-tac figurés par des points décrivent l'écoulement du temps propre le long des

1. Les « Keystone Kops » sont les personnages de films comiques américains de l'époque du cinéma muet. Il s'agit d'un groupe d'officiers de police complètement stupides, qui font bévues sur bévues. (N.d.T)

lignes d'univers. Les unités n'ont aucune importance – secondes, nanosecondes, années, comme il vous plaira. Plus l'horloge est proche de l'horizon du trou noir, plus son tic-tac paraît lent. Pile sur l'horizon, le temps s'arrête complètement pour les horloges qui restent à l'extérieur du trou noir.



Le ralentissement gravitationnel des horloges se produit dans des circonstances moins exotiques qu'au voisinage de l'horizon d'un trou noir. Une version moins brutale se produit à la surface du Soleil. Les atomes sont de minuscules horloges dont les électrons filant tout autour du noyau serait les aiguilles. Vus depuis la Terre, les atomes du Soleil semblent être un peu lents.

Perte de la simultanéité, paradoxe des jumeaux, courbure de l'espace-temps, trous noirs, machines à voyager dans le temps... Tant d'idées farfelues, dépassant la fiction. Et encore ne s'agit-il que de celles qui sont sûres, des concepts consensuels sur lesquels les physiciens sont d'accord. Comprendre la nouvelle physique de l'espace-temps a demandé un recâblage pénible des façons de voir – géométrie différentielle, calcul tensoriel, métrique de l'espace-temps, formes différentielles. Pourtant, même ce passage difficile au domaine quantique d'Alice au pays des merveilles n'était rien comparé aux difficultés conceptuelles déconcertantes que nous rencontrons aujourd'hui en tentant de réconcilier la relativité générale et la mécanique quantique. On a eu l'impression par moments dans le passé que cette dernière ne pouvait pas coexister avec la théorie d'Einstein de la gravitation et devrait être abandonnée. Peut-être pourrions-nous dire que la guerre du trou noir a

été « la guerre qui a pacifié le monde pour permettre l'avènement de la mécanique quantique¹ ».

Je m'assignerai comme tâche, dans le prochain chapitre, de réussir l'impossible, à savoir atteindre le but chimérique de vous reprogrammer pour la mécanique quantique à peu près sans équations. Les véritables outils pour gnoquer l'univers quantique sont d'abstraites mathématiques : espaces de Hilbert de dimension infinie, opérateurs de projection, matrices unitaires et bien d'autres outils élaborés nécessitant un apprentissage de quelques années. Nous n'allons pas tarder à voir comment nous allons nous y prendre.

1. « *The War That Made the World Safe for Quantum Mechanics* » : cette phrase a donné le sous-titre de l'édition en anglais du livre, « *My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics* », ma controverse avec Stephen Hawking afin de pacifier le monde pour permettre l'avènement de la mécanique quantique. (N.d.T.)

« Einstein, ne dis pas à Dieu
ce qu'il doit faire ! »



Posant sa tasse de thé, elle demanda timidement :
« La lumière est-elle faite d'ondes ou de particules ? »

Une table était dressée sous un arbre devant la maison. Le Lièvre de Mars et le Chapelier y prenaient le thé. Assis entre eux, un Loir était endormi et les deux autres s'en servaient comme d'un coussin : ils étaient accoudés sur lui et parlaient par-dessus sa tête. « Pas très confortable pour le Loir, pensa Alice. Mais je suppose qu'il s'en moque puisqu'il dort¹. »

Depuis son dernier cours de science, quelque chose troublait profondément Alice et elle espérait que l'une de ses nouvelles

1. Lewis Carroll, *Les Aventures d'Alice au pays des merveilles*, illustré par John Tenniel (Londres, Éditions Macmillan and Company, 1865).

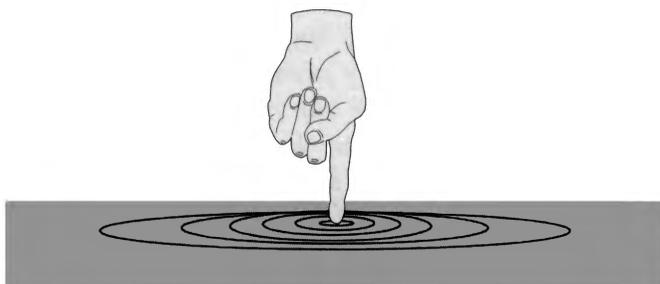
connaissances pourrait y mettre un peu de clarté. Posant sa tasse de thé, elle demanda timidement : « La lumière est-elle faite d'ondes ou de particules ? – C'est exactement cela ! » répliqua le Chapelier fou. Quelque peu irritée, Alice demanda un peu plus fort : « En voilà une réponse ! Je vais répéter ma question : la lumière est-elle particules ou ondes ? – Très juste ! » dit le Chapelier fou.

Bienvenue chez les dingues, dans le monde fou, saugrenu de la mécanique quantique, où tout est sens dessus dessous, où l'incertitude fait loi et où rien ne tient debout pour les gens normaux...

En guise de réponse à Alice...

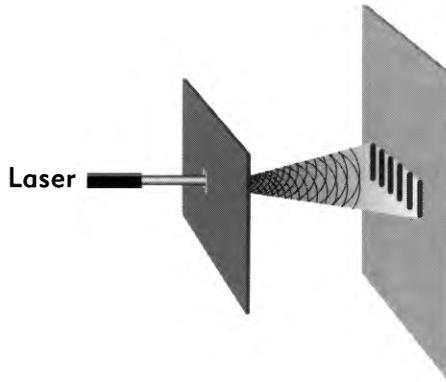
Newton croyait qu'un rayon de lumière était un courant de petites particules, un peu comme un tir de mitraille. Bien que la théorie fût presque complètement fausse, il inventa des explications extrêmement claires pour de nombreuses propriétés de la lumière. Vers 1865, le mathématicien et physicien écossais James Clerk Maxwell avait complètement jeté le discrédit sur la théorie newtonienne de la mitraille. Maxwell soutenait que la lumière consistait en ondes, les *ondes électromagnétiques*. Les constructions de Maxwell reçurent une confirmation sur toute la ligne et devinrent la théorie reconnue.

Maxwell montra que des charges électriques en mouvement – par exemple la vibration des électrons dans un fil conducteur – créent des perturbations de type ondulatoire, exactement comme le fait d'agiter un doigt sur un plan d'eau donne naissance à des ondes en surface.

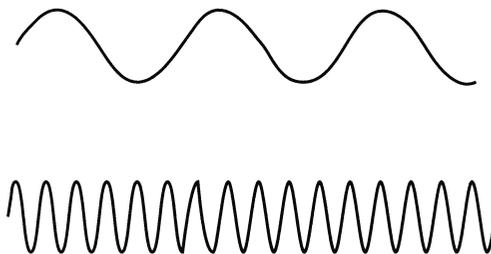


Les ondes lumineuses sont constituées de champs électriques et magnétiques – les mêmes que ceux qui entourent des particules

électriquement chargées, le courant électrique dans un fil et les aimants ordinaires. Quand ces charges ou courants vibrent, ils secouent les ondes qui se déploient à travers le vide à la vitesse de la lumière. En fait, en projetant un rayon lumineux à travers deux fentes minuscules, on voit apparaître nettement un réseau d'*interférences* formé par le chevauchement des ondes.



La théorie de Maxwell explique même pourquoi la lumière se présente sous différentes couleurs. Les ondes sont caractérisées par leur longueur d'onde – la distance entre deux crêtes. Voici deux ondes, la première ayant une longueur d'onde plus grande que la seconde.



Imaginez qu'elles vous passent juste sous le nez à la vitesse de la lumière. Dans le même temps, les ondes oscillent du minimum au maximum et inversement : plus la longueur d'onde est courte, plus les oscillations sont rapides. Le nombre d'oscillations complètes (du maximum au minimum et retour au maximum) par seconde est appelé la *fréquence* et il est évident qu'elle est plus grande pour la longueur d'onde la plus courte.

Quand la lumière pénètre dans l'œil, différentes fréquences agissent sur les bâtonnets et les cônes de la rétine de différentes façons. Un signal est transmis au cerveau disant rouge, ou orange, jaune, vert, bleu, violet selon la fréquence en jeu (ou la longueur d'onde). L'extrémité rouge du spectre est faite d'ondes plus longues (de plus basse fréquence) que le bleu ou l'extrémité violette : la longueur d'onde du rouge est d'environ 700 nanomètres¹ alors que celle du violet fait seulement la moitié. Du fait de la très grande vitesse de la lumière, la fréquence de ces oscillations est énorme. La lumière bleue oscille un million de milliard (10^{15}) de fois par seconde ; la lumière rouge environ la moitié de cela. Dans le jargon de la physique, la fréquence de la lumière bleue est de 10^{15} Hz.

Y a-t-il des longueurs d'onde plus grandes que 700 nanomètres ou plus petites que 400 ? Oui, mais on ne parle plus alors de lumière : l'œil est insensible à de telles longueurs d'onde. Les rayons ultraviolets et les rayons X ont des longueurs d'ondes plus courtes que celle du violet, les plus courtes étant celles des rayons qu'on nomme rayons gamma. Du côté des longueurs d'ondes plus grandes, il y a les rayons infrarouges, les micro-ondes et les ondes radio. L'ensemble du spectre, des rayons gamma aux ondes radio, est appelé *rayonnement électromagnétique*.

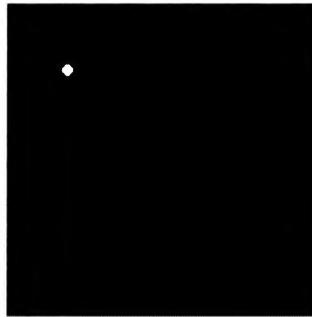
Voilà pourquoi, Alice, la réponse à ta question est que la lumière est sans aucun doute faite d'ondes.

Encore que... pas si vite ! Entre 1900 et 1905, une surprise très troublante a bouleversé les fondements de la physique, laissant la question dans un état de confusion complète pendant plus de vingt ans. (Certains diraient que c'est toujours le cas...) Partant du travail de Max Planck, Einstein a complètement « corrompu le paradigme dominant ». Nous n'avons ni le temps ni la place de développer la façon dont il y parvint mais, vers 1905, Einstein était convaincu que la lumière était faite de particules qu'il appela *quanta*. Plus tard, on les appela *photons*. Pour ne parler de cette fascinante histoire que dans ses grandes lignes, la lumière, lorsqu'elle est extrêmement faible, se comporte comme des particules arrivant une par une, comme s'il s'agissait de balles survolant par intermittence. Revenons à l'expérience où la lumière traverse deux fentes pour parvenir en fin de compte à un écran.

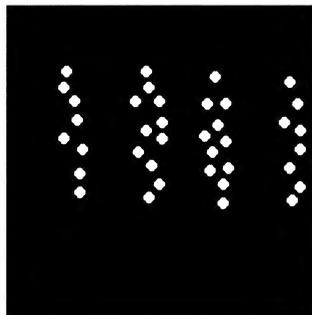
1. Un nanomètre représente un milliardième de mètre, soit 10^{-9} mètre.

Imaginez que la source de lumière soit réduite à un mince filet. Un théoricien des ondes s'attendrait à distinguer un motif très vague, semblable à celui des ondes, à peine visible, voire pas visible du tout mais, quoi qu'il en soit, un motif ondulatoire.

Ce n'est pas ce qu'Einstein avait prédit et, comme d'habitude, il avait raison. En lieu et place d'un éclairage continu, sa théorie prédisait un flash ponctuel de lumière, le premier apparaissant de manière aléatoire en quelque point imprévisible de l'écran.



Un autre flash apparaîtrait ailleurs d'une façon tout aussi aléatoire, puis encore un autre. Si l'on photographiait les éclats lumineux en superposition, un motif commencerait à se former à partir des flashes aléatoires – un motif ondulatoire.



Alors ? Particule ou onde ? La réponse dépend de l'expérience et de la question posée. Si l'expérience met en jeu une lumière si faible que les photons s'écoulent un par un, la lumière semble être faite de photons imprévisibles, arrivant de façon aléatoire. Mais s'il y en a suffisamment pour former un motif, la lumière se comporte comme une onde. Le grand physicien Niels Bohr a décrit cette

situation déroutante en affirmant que les théories ondulatoire et corpusculaire de la lumière étaient *complémentaires*.

Einstein a avancé qu'il fallait que les photons eussent de l'énergie. C'était évident. La lumière solaire – les photons émis par le Soleil – réchauffe la Terre. Les panneaux solaires la transforment en électricité qui peut à son tour faire tourner un moteur et soulever une lourde charge. Si la lumière possède de l'énergie, il doit en être de même des photons qui la composent.

Il est clair qu'un simple photon ne transporte que peu d'énergie, mais combien exactement ? Combien faut-il de photons pour faire bouillir une tasse de thé ou faire tourner un moteur de 100 watts pendant une heure ? La réponse dépend de la longueur d'onde du rayonnement. Plus la longueur d'onde d'un photon est grande, moins il est énergétique. Il faut donc davantage de photons à grande longueur d'onde pour effectuer un travail donné. Une formule très célèbre – pas autant que $E = mc^2$, mais très célèbre quand même – fournit l'énergie d'un photon isolé en fonction de sa fréquence¹ :

$$E = hf$$

À gauche, E représente l'énergie du photon, exprimée dans une unité appelée le joule. À droite, f est la fréquence. Pour une lumière bleue, la fréquence est de 10^{15} Hz. Reste h , la fameuse constante de Planck introduite par Max Planck en 1900. C'est un nombre très petit, mais il s'agit d'une des constantes les plus importantes de la nature : elle contrôle tous les phénomènes quantiques. Elle est à ranger avec la vitesse de la lumière, c , et la constante de gravitation de Newton, G :

$$h = 6,62 \times 10^{-34}.$$

Du fait de cette petitesse, l'énergie d'un photon isolé est infime. Pour calculer l'énergie d'un photon de lumière bleue, il faut multiplier la constante de Planck par sa fréquence, 10^{15} Hz, ce qui donne $6,62 \times 10^{-19}$ joule. C'est très peu : il faudrait 10^{39} photons de lumière bleue pour faire bouillir votre tasse de thé. Et environ deux fois plus de photons de lumière rouge. Par contre,

1. Cette formule fut introduite par Max Planck en 1900. Mais c'est Einstein qui a compris que la lumière est faite de quanta semblables à des particules et que la formule s'applique à l'énergie d'un photon isolé.

avec l'énergie des rayons gamma la plus grande qu'on ait jamais détectée, il faudrait simplement 10^{18} photons.

Mais foin de tous ces nombres et formules ! Tout ce que je vous demande de retenir est que plus la longueur d'onde d'un rayon lumineux est courte, plus l'énergie d'un photon isolé est grande. Grande énergie : petite longueur d'onde. Petite énergie : grande longueur d'onde. Répétez-le plusieurs fois, puis écrivez-le. Répétez-le encore – grande énergie : petite longueur d'onde ; petite énergie : grande longueur d'onde.

Prédire le futur ?

Einstein déclara pompeusement : « Dieu ne joue pas aux dés¹. » La réponse de Niels Bohr arriva, cinglante : « Einstein, gronda Bohr, ne dis pas à Dieu ce qu'il doit faire. » Les deux physiciens étaient essentiellement athées ; on les imagine mal en train de contempler une divinité installée sur un nuage et essayant de lancer un sept au craps² ! Mais tant Bohr qu'Einstein étaient aux prises avec quelque chose de complètement nouveau en physique – quelque chose qu'Einstein ne pouvait tout simplement pas accepter : l'imprédictibilité qu'impliquaient les nouvelles règles étranges de la mécanique quantique. Einstein, avec son système de pensée, s'insurgeait à l'idée d'un élément aléatoire, incontrôlable dans les lois de la nature. Que l'arrivée d'un photon soit vraiment un événement imprédictible le prenait profondément à rebrousse-poil. À l'opposé, Bohr en accepta l'idée, qu'elle lui ait plu ou non. Il comprit aussi que les physiciens à venir devraient reprogrammer leurs façons de voir pour accéder à la mécanique quantique, ce qui engloberait l'imprédictibilité redoutée par Einstein.

Ce n'est pas que Bohr ait eu une meilleure vision des phénomènes quantiques ou qu'il se soit senti plus à l'aise avec eux. « Quiconque n'est pas choqué par la théorie quantique ne l'a pas comprise », a-t-il dit une fois. Bien des années plus tard, Richard Feynman fit cette remarque : « Je pense qu'on peut dire à coup sûr que personne ne comprend la mécanique quantique. » Il ajouta : « Plus on observe un comportement étrange de la nature, plus il

1. Lettre à Max Born du 12 décembre 1926.

2. Il s'agit d'un jeu où il faut réaliser un score en lançant deux dés. (*N.d.T.*)

devient difficile de trouver un modèle expliquant comment se passent en fin de compte les choses les plus simples. C'est pourquoi les physiciens théoriciens y ont renoncé. » Je ne pense pas que Feynman voulait vraiment dire que les physiciens devraient renoncer à expliquer les phénomènes quantiques : en fait, il passait son temps à les expliquer ! Ce qu'il voulait dire était qu'il est impossible d'y mettre des mots pouvant faire naître une représentation dans un esprit humain doté d'une programmation standard. Feynman, pas moins que quiconque, devait faire appel aux mathématiques abstraites. Il est évident que lire un chapitre sans équation dans un livre ne peut pas vous reprogrammer mais, avec de la patience, il doit être possible de saisir l'essentiel.

La première chose dont les physiciens ont dû se libérer a été cette idée que les lois de la nature sont déterministes – ce qu'Einstein tenait pour si précieux. Le déterminisme postule que le futur peut être prédit à partir d'une connaissance suffisante du présent. La mécanique newtonienne, de même que tout ce qui a suivi, était entièrement tournée vers la prédiction du futur. Pierre Simon de Laplace – celui-là même qui a imaginé les étoiles sombres – était convaincu que le futur pourrait être prédit. Voici ce qu'il écrivit :

Nous devons envisager l'état présent de l'univers comme l'effet de son état antérieur, et comme la cause de celui qui va suivre. Une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux.

Laplace se contentait d'exposer les conséquences des lois newtoniennes du mouvement. Pour sûr, le regard de Newton-Laplace sur la nature est la forme la plus pure du *déterminisme* : pour prédire le futur, tout ce qu'on a besoin de connaître est la position et la vitesse de toute particule de l'univers à un instant pris comme origine. Ah oui ! Il y a aussi autre chose : il faut connaître toutes les forces agissant sur chaque particule. Remarquez qu'il ne suffit pas de connaître la position à un instant donné. Savoir où se trouve une particule ne vous dit en rien où elle va aller. Mais si l'on

connaît aussi sa vitesse¹ – à la fois sa grandeur, sa direction et son sens –, on peut dire où elle se trouvera plus tard. Les physiciens parlent de *conditions initiales*, c'est-à-dire tout ce qu'il vous faut connaître à un instant donné pour prédire l'évolution d'un système.

Pour comprendre ce que signifie le déterminisme imaginons le plus simple des mondes possibles : un monde simple au point qu'il y a seulement deux états. Une pièce de monnaie en est un bon modèle : « pile » ou « face ». Il nous faut aussi une loi qui dit comment se font les transformations d'un instant au suivant. Deux possibilités pour une telle loi.

- Le premier exemple est sans intérêt. La règle est : il ne se passe rien. Si la pièce montre face à un moment, elle montre face à l'instant suivant (disons une nanoseconde plus tard). De même, si elle affiche pile à un instant, elle reste sur pile au suivant. La loi peut être résumée en une simple paire de « formules » :

$$F \rightarrow F \quad P \rightarrow P$$

L'histoire de ce monde est ou bien F F F F F... ou bien P P P P P... répété indéfiniment.

- Si la première règle est ennuyeuse, la suivante l'est à peine moins : quel que soit l'état à un instant, une nanoseconde plus tard, on bascule à l'état opposé. En symboles, on peut représenter la situation comme suit :

$$F \rightarrow P \quad P \rightarrow F$$

L'histoire prendrait la forme suivante F P F P F P F P... ou P F P F P F P F...

Les deux règles sont déterministes, c'est-à-dire que le futur est parfaitement déterminé par le point de départ. Dans chaque cas, si l'on connaît les conditions initiales, on peut prédire avec certitude ce qui arrivera n'importe quand.

Les lois déterministes ne sont pas les seules possibles. Il peut aussi y avoir des lois aléatoires. La plus simple serait que, quelles que puissent être les conditions initiales, à l'instant suivant on a, au hasard, face ou pile. Un scénario possible, commençant par pile,

1. Par *vitesse*, on n'entend pas seulement avec quelle rapidité un objet est en train de se mouvoir mais aussi la direction et le sens du mouvement. Ainsi, « 100 kilomètres à l'heure » ne fournit pas une information complète sur la vitesse ; par contre « 100 kilomètres à l'heure dans la direction nord-nord-ouest » si.

serait : P P P F F F P P F F P F F P P... Mais cela pourrait aussi bien être P P F P F F P F F F P P... En fait, n'importe quelle succession serait possible. Vous pouvez y voir aussi bien un monde sans loi qu'un monde dont la loi réinitialise les conditions initiales de façon aléatoire.

Mais la loi n'est pas nécessairement entièrement déterministe ou entièrement aléatoire. Ce sont là des situations extrêmes. Une loi essentiellement déterministe, avec une simple pincée de hasard, est possible. La loi pourrait dire qu'il y a une probabilité de neuf dixièmes pour que rien ne change et une probabilité de un dixième pour que ça bascule. Un scénario typique ressemblerait à ceci :

F F F F F F F P P P P P P P P P P P F F F F F F F F F F F
F F F P P P P P...

Dans un tel cas, un parieur pourrait faire une assez bonne estimation sur le futur immédiat : l'état à venir serait, selon toute vraisemblance, le même que l'état présent. Il pourrait même être un peu plus audacieux et juger que les deux états suivants resteront inchangés. Ses chances d'avoir raison seraient bonnes, pourvu qu'il ne pousse pas trop loin. S'il s'essayait à une prédiction sur un futur trop lointain, il ne serait pas loin d'avoir autant de chances d'avoir raison que le contraire. C'est exactement contre ce genre d'imprédictibilité qu'Einstein pestait quand il disait que Dieu ne joue pas aux dés.

Peut-être quelque chose vous laisse-t-il sceptique : une succession de lancers d'une pièce de monnaie véritable ressemble bien plus à la loi complètement aléatoire qu'à l'une des lois déterministes. Le hasard semble être un attribut banal de la nature. Qu'avons-nous besoin de la mécanique quantique pour rendre le monde imprédictible ? Mais, si un lancer de pièce de monnaie ordinaire est imprédictible – même sans mécanique quantique –, c'est simplement dû à un manque de précision certain. Tenir compte de tous les détails qui interviennent est en général trop difficile. Une pièce de monnaie n'est pas réellement un univers isolé. Les particularités des muscles qui mettent en mouvement la main qui effectue le lancer, les courants d'air de la chambre, les vibrations thermiques des molécules, celles de la pièce de monnaie comme celles de l'air : tout cela joue sur le résultat et, dans la plupart des cas, il y a une quantité d'informations bien trop grande pour qu'on puisse les appréhender toutes. Rappelez-vous : Laplace parlait de connaître « toutes les forces dont la nature est animée et la situa-

tion respective des êtres qui la composent ». La plus petite erreur sur la position d'une seule molécule réduirait à néant notre capacité à prédire le futur. Mais ce n'est pas cette sorte de hasard qui gênait Einstein. En évoquant Dieu jouant aux dés, Einstein signifiait que les lois de la nature les plus profondes ont une part inévitable d'aléatoire dont on ne peut jamais triompher, quand bien même on connaîtrait tout ce qui peut être connu.

L'information ne disparaît jamais

Une raison convaincante de ne pas faire de place au hasard est que, dans la plupart des cas, cela conduirait à violer le *principe de conservation de l'énergie* (reportez-vous au chapitre 7). Cette loi affirme que l'énergie a beau se présenter sous de nombreuses formes et passer de l'une à l'autre, sa quantité totale ne change jamais. Il s'agit là d'un des faits objectifs les plus vérifiés et il y a peu de chances qu'on parvienne à l'infirmier. Des variations aléatoires modifieraient l'énergie d'un objet en l'augmentant brutalement ou, au contraire, en la diminuant.

Il y a une autre loi de la physique très subtile peut-être encore plus fondamentale que la conservation de l'énergie. On l'appelle parfois réversibilité mais appelons-la simplement *principe de conservation de l'information*. Une conséquence en est qu'une précision parfaite dans la connaissance du présent permet à tout jamais de prédire le futur. Mais ce n'est pas là toute l'histoire : la connaissance du présent vous amène à être absolument certain du passé. Cela fonctionne dans les deux sens.

Dans l'univers à pile ou face d'une pièce de monnaie, une loi purement déterministe nous assurerait que l'information est parfaitement conservée. Par exemple, avec la loi

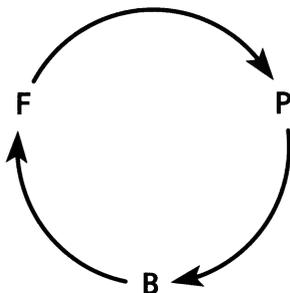
$$F \rightarrow P \quad P \rightarrow F$$

passé comme futur peuvent être prédits à la perfection. Mais introduire la plus petite dose de hasard détruirait cette perfection dans la prédiction.

Voyons cela sur un autre exemple, cette fois avec une pièce de monnaie fictive à trois faces (un dé est une pièce de monnaie à six faces). Appelons-les Pile, Face, Base, ou P, F, B. Voici une loi parfaitement déterministe :

$$F \rightarrow P \quad P \rightarrow B \quad B \rightarrow F$$

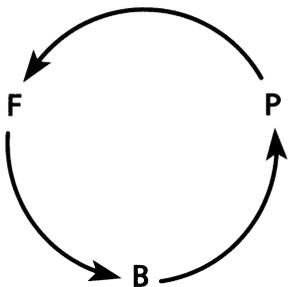
Pour bien nous la représenter, aidons-nous d'un diagramme.



Régie par une telle loi, l'histoire du monde, commencée par F, ressemblerait à ceci :

F P B F P B F P B F P B F P B F P B F P B F P B F P B F P B F P B F P B F P B...

Y a-t-il un moyen de vérifier expérimentalement la conservation de l'information ? En réalité, il y en a beaucoup, certains réalisables et d'autres non. Si vous aviez le contrôle de la loi et pouviez la modifier à volonté, il y en aurait un très simple. Voici comment on pourrait s'y prendre avec notre pièce à trois faces. On commence par une des faces et on laisse les choses se faire pendant un certain temps. Supposons que le changement d'état se fasse toutes les nanosecondes : F puis P puis B, passant de façon cyclique d'un état à l'autre. À la fin de l'intervalle de temps imparti, on change la loi, la nouvelle étant comme l'ancienne mais en sens contraire – donc en sens inverse des aiguilles d'une montre cette fois.

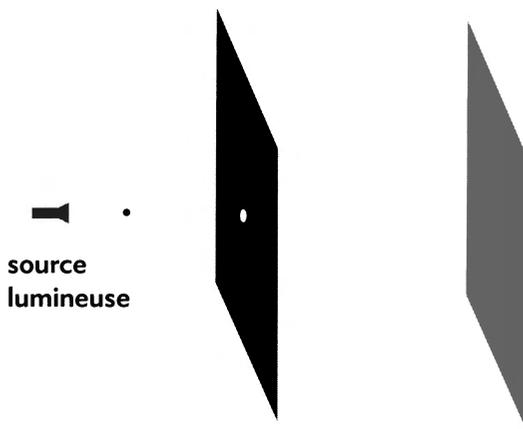


Laissons les choses se dérouler pendant exactement la même durée que précédemment. L'histoire va se dérouler à rebours et la

pièce de monnaie va retourner au point de départ. Peu importe le délai, la loi déterministe a parfaitement gardé en mémoire les conditions initiales où l'on peut toujours retourner. Pour vérifier la conservation de l'information, vous n'avez pas même besoin de connaître précisément la loi du moment que vous savez comment l'inverser. Avec une loi déterministe, cela fonctionnera toujours. Mais cela tombera en défaut avec l'introduction du hasard, à moins que ce dernier ne soit d'un genre très subtil.

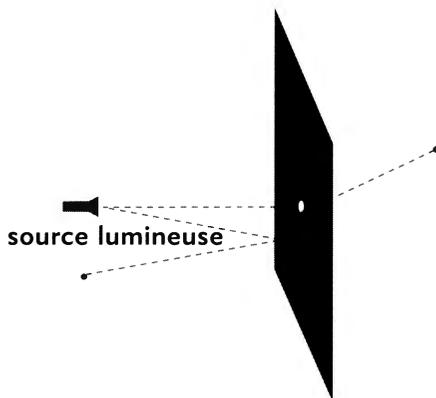
Mais revenons à Einstein, Bohr, Dieu (lisez : les lois de la physique) et la mécanique quantique. Une autre citation célèbre d'Einstein est « Dieu est subtil, mais il n'est pas malveillant ». Je ne sais pas ce qui le rendait si sûr que les lois de la physique ne sont pas malveillantes... À titre personnel, il m'arrive de trouver que les lois de la gravité sont à la limite de la malveillance, et cela m'arrive de plus en plus souvent à mesure que je vieillis... Par contre, Einstein avait raison sur la subtilité. Les lois de la mécanique quantique sont si subtiles qu'elles permettent au hasard de côtoyer tout à la fois le principe de conservation de l'énergie et de l'information.

Prenons une particule – n'importe laquelle ferait l'affaire, mais disons un photon. Il est produit par une source lumineuse, par exemple un laser, et dirigé en direction d'une plaque métallique opaque avec un trou minuscule. De l'autre côté, un écran phosphorescent qui produit un éclat quand il est heurté par un photon.



Au bout d'un certain temps, ou bien le photon est passé à travers le trou, ou bien il l'a raté et a rebondi sur l'obstacle de la

plaque. S'il a traversé par le trou, il aura heurté l'écran phosphorescent, mais pas forcément juste de l'autre côté du trou. Au lieu de se déplacer en ligne droite, le photon peut avoir reçu au passage une impulsion aléatoire en sorte que sa position finale est imprévisible.



Ôtons maintenant l'écran phosphorescent et recommençons l'expérience. Après un petit moment, on peut affirmer que le photon ou bien a rebondi sur la plaque ou bien est passé par le trou avec au passage une impulsion aléatoire. Mais sans rien pour le détecter, il est impossible de dire où se trouve le photon et dans quelle direction il se dirige.

Mais imaginons que nous intervenions et inversions la loi du mouvement du photon¹. À quoi pouvons-nous nous attendre en laissant se dérouler ce mouvement inverse pendant la même durée ? L'évidence est que le hasard (le hasard à l'envers reste du hasard) ruinerait tout espoir de voir le photon retourner à sa position initiale. Le caractère aléatoire de la deuxième partie de l'expérience ajouté à celui de la première partie rend le mouvement du photon encore moins prévisible.

Pourtant, la réponse est bien plus subtile. Mais, avant que je ne vous l'explique, revenons un moment à notre pièce de monnaie à trois faces. Là aussi nous avons laissé la loi se dérouler dans un

1. Les experts qui sont parmi vous se demanderont peut-être s'il est vraiment possible d'intervenir pour inverser une loi. En pratique, cela n'est généralement pas possible, en dehors de certains systèmes simples pour lesquels cela ne présente aucune difficulté. Mais peu importe : en tant qu'expérience de pensée, ou d'exercice de mathématiques, c'est entièrement réalisable.

sens avant de l'inverser. Mais il y a un détail que j'avais laissé de côté : quelqu'un regardait-il ou non la pièce de monnaie juste avant que nous n'inversions la loi ? Quelle différence cela aurait-il fait ? Aucune, du moins tant que le fait de regarder la pièce de monnaie ne la fait pas passer à un autre état. Cela ne paraît pas une condition très contraignante : personne n'a encore jamais vu une pièce lancée en l'air passer de pile à face ou le contraire simplement parce que quelqu'un l'a regardée ! Mais, dans l'univers délicat de la mécanique quantique, impossible de regarder quelque chose sans la perturber.

Prenez notre photon. Dans le mouvement inverse, rejoint-il sa position initiale ou les aléas de la mécanique quantique ruinent-ils tout espoir de conservation de l'information ? La réponse est étrange : tout dépend du fait qu'on regarde ou non le photon à l'instant où nous intervenons. Par « regarder le photon », je veux dire vérifier sa position ou la direction de son mouvement. Si nous le regardons, le résultat final (après le mouvement inverse) sera aléatoire, avec perte de l'information. Mais si nous ne nous préoccupons pas de localiser le photon – c'est-à-dire si nous ne faisons strictement rien pour déterminer sa position ou la direction de son mouvement – et nous contentons d'inverser la loi, il réapparaîtra comme par magie à sa position initiale après le délai prescrit. Dit autrement, en dépit de ses aspects imprévisibles, la mécanique quantique respecte le principe de conservation de l'information. On ne sait pas si Dieu est malfaisant ou non, mais il est certainement subtil !

Inverser les lois de la physique est parfaitement réalisable, du moins d'un point de vue mathématique. Qu'en est-il en réalité ? J'ai les plus grands doutes sur le fait que quiconque ait jamais pu inverser quelque système que ce soit en dehors de systèmes très élémentaires. Quoi qu'il en soit, que nous y parvenions ou pas en pratique, la réversibilité mathématique de la mécanique quantique – les physiciens parlent de son *unitarité* – est au cœur de sa cohérence. La logique quantique ne tiendrait pas sans elle.

Alors pourquoi Hawking pensait-il que l'information était détruite quand la théorie quantique était combinée avec la gravité ? Pour réduire les arguments à un slogan :

Une information qui tombe dans un trou noir est une information perdue.

Pour le dire autrement, la loi ne peut jamais être inversée car rien ne ressort jamais de l'horizon d'un trou noir.

Si Hawking avait eu raison, les lois de la physique auraient possédé un caractère aléatoire accru et ce sont toutes les fondations de la physique qui se seraient effondrées. Mais nous y reviendrons.

Le principe d'incertitude

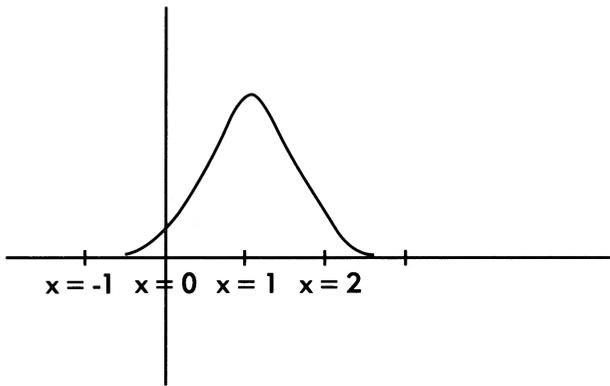
Laplace pensait être capable de prédire le futur s'il pouvait seulement posséder suffisamment d'informations sur le présent. Malheureusement pour les soi-disant diseurs de bonne aventure, il est impossible de connaître à la fois la position et la vitesse d'un objet. Et quand je dis impossible, je ne veux pas dire que c'est très difficile ou que c'est la technologie actuelle qui n'est pas à la hauteur. Aucune technique obéissant aux lois de la physique ne pourra *jamais* être à la hauteur, pas plus qu'une technologie améliorée ne pourra permettre un déplacement plus rapide que la lumière. Toute expérience conçue pour mesurer simultanément la position et la vitesse d'une particule se heurtera au principe d'incertitude de Heisenberg.

C'est ce principe qui constitue la ligne de démarcation entre l'ère *classique* préquantique de la physique et celle, postmoderne, de l'« étrangeté » quantique. La physique classique englobe tout ce qui fut produit avant la mécanique quantique, y compris la théorie newtonienne du mouvement, celle de Maxwell de la lumière ou la relativité d'Einstein. La physique classique est déterministe quand la physique quantique est remplie d'incertitudes.

Le principe d'incertitude est une affirmation aussi étrange qu'audacieuse proférée en 1927 par un physicien de vingt-six ans, Werner Heisenberg, peu après que lui-même et Erwin Schrödinger eurent découvert les mathématiques de la mécanique quantique. Même à cette époque d'idées dérangeantes, cela est apparu comme particulièrement bizarre. Heisenberg n'affirmait pas qu'il y a une limite à la précision dans la mesure de la position d'un objet dans l'espace : les coordonnées qui la fournissent peuvent être déterminées à n'importe quel degré de précision. Il n'affirmait pas plus qu'il y a une limite à la précision dans la détermination de la vitesse d'un objet. Ce qu'il affirmait était qu'aucune expérience, si complexe et ingénieuse qu'elle fût, ne pourrait être conçue pour mesurer à la fois la position et la

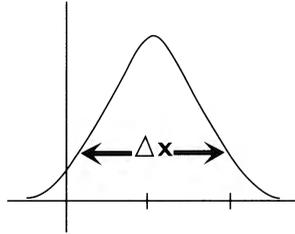
vitesse. Tout se passe comme si le Dieu d'Einstein s'était assuré que personne ne puisse jamais en savoir assez pour être capable de prédire le futur.

Dans le principe d'incertitude, il n'est question que de flou mais, paradoxalement, il n'a lui-même rien de flou. L'incertitude est un concept précis, mettant en jeu calcul de probabilité, calcul intégral et autres mathématiques raffinées. Mais, pour paraphraser une formule bien connue, une image vaut mieux que des centaines d'équations. Commençons par l'idée d'une distribution de probabilités. Supposons que nous étudions un très grand nombre de particules, disons mille milliards, en mesurant leur position le long de l'axe horizontal – l'axe des x . On trouve la première particule à $x = 1,325\ 7$, la seconde à $x = 0,913\ 4$, etc. Nous pourrions dresser une longue liste des positions de ces particules. Malheureusement, elle remplirait environ dix millions de livres de la taille de celui que vous tenez en main et, dans la plupart des cas, on se moque éperdument d'avoir une telle liste. Il serait bien plus instructif de posséder un graphique statistique donnant la proportion de particules correspondant à chaque valeur de x . Cela pourrait ressembler à ceci :

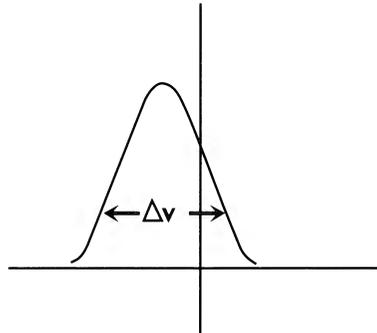


Un coup d'œil à ce graphique nous informe que la plupart des particules ont été détectées aux environs de $x = 1$. Pour certains usages, cela pourrait bien s'avérer suffisant. Mais un simple examen attentif du graphique nous permet d'être bien plus précis. À peu près 90 % des particules se trouvaient entre $x = 0$ et $x = 2$. Si l'on devait parier sur la position d'une particule, le meilleur choix serait $x = 1$ mais l'incertitude – la mesure mathématique de la « largeur » de la

courbe – serait d'environ 2 unités¹. La lettre grecque delta (Δ) est le symbole mathématique standard pour l'incertitude. Dans cet exemple Δx représente l'incertitude sur la coordonnée x des particules.



Faisons une autre expérience de pensée. Au lieu de mesurer la position des particules, mesurons leur vitesse, comptée positivement si elles se déplacent vers la droite et négativement si elles se déplacent vers la gauche. Cette fois, l'axe horizontal représente la vitesse v .



On peut voir sur le graphique que la plupart des particules se déplacent vers la gauche et l'on peut aussi se faire une assez bonne idée de l'incertitude sur la vitesse, Δv .

En gros, ce que dit le principe d'incertitude est que toute tentative de réduire l'incertitude sur la position augmentera inévitablement celle sur la vitesse. Par exemple, nous pourrions délibérément choisir ces particules dans une bande étroite – mettons entre $x = 0,9$ et $x = 1,1$ –, en laissant tomber toutes les autres. Pour un tel choix

1. Bien entendu, la courbe en forme de cloche va au-delà des extrémités des flèches du graphique ci-dessus : il est donc possible de trouver des particules dans des zones excentrées. L'incertitude mathématique nous fournit l'étendue des valeurs *probables*.

du sous-ensemble de particules, l'incertitude serait seulement de 0,2, soit dix fois plus petite que le Δx original. En procédant ainsi, on peut espérer mettre en défaut le principe d'incertitude... mais ça ne marche pas !

Il se trouve que la mesure des vitesses du même sous-ensemble de particules donne une distribution bien plus éparpillée qu'elle ne l'était au départ. Peut-être vous demandez-vous quelle en est la raison, mais j'ai bien peur qu'il ne s'agisse là d'un de ces incompréhensibles faits quantiques pour lesquels nous n'avons aucune explication classique – une de ces choses à propos desquelles Feynman disait : « La physique théorique a renoncé à [expliquer] cela. »

Quoi qu'il en soit, c'est là un fait expérimental : de quelque façon que nous nous y prenions pour réduire Δx , il s'ensuit inévitablement un accroissement de Δv . De même, une manipulation quelconque réduisant Δv fera s'accroître Δx . Plus nous essayons de localiser avec précision une particule, plus grande sera l'incertitude sur sa vitesse et vice versa.

Voilà en gros comment sont les choses ; mais Heisenberg a été plus précis dans l'énoncé du principe d'incertitude : le produit entre Δx , Δv et la masse m de la particule est toujours plus grand (>) que la constante de Planck, h :

$$m \cdot \Delta x \cdot \Delta v > h$$

Voyons un peu comment fonctionne tout cela. Supposons que nous ayons conditionné soigneusement les particules en sorte que le Δx soit extrêmement petit. Cela oblige le Δv à être suffisamment grand pour que le produit soit supérieur à h . Plus nous rendrons Δx petit, plus Δv devra être grand.

Comment se fait-il que nous ne remarquions pas le principe d'incertitude dans la vie quotidienne ? Vous est-il jamais arrivé, en conduisant, de voir votre position devenir de plus en plus floue sous prétexte que vous regardiez attentivement votre compteur de vitesse ? Ou observer un comportement délirant de ce compteur parce que vous étiez en train de chercher où vous vous trouviez sur une carte ? Bien sûr que non ! Mais d'ailleurs, comment cela se fait-il ? Après tout, le principe d'incertitude ne fait pas de favoritisme : il s'applique à tout, aussi bien à vous et à votre voiture qu'aux électrons. La réponse vient de la masse qui apparaît dans la formule et du fait que la constante de Planck est

très petite. Dans le cas d'un électron, la petitesse de la masse tend à compenser celle de la constante de Planck, aussi les incertitudes conjuguées Δx et Δv doivent-elles être passablement grandes. Mais la masse d'une voiture est énorme par rapport à la constante de Planck et c'est pourquoi Δx et Δv peuvent être toutes deux incommensurablement petites sans pour autant violer le principe d'incertitude. Vous voyez peut-être maintenant pourquoi la nature n'a pas préparé nos cerveaux à l'incertitude quantique : ce n'était pas nécessaire. Dans la vie de tous les jours, nous ne rencontrons jamais d'objets suffisamment légers pour que le principe d'incertitude importe.

Voici en fin de compte ce qu'est le principe d'incertitude : un cercle vicieux qui garantit que personne n'en saura jamais assez pour prédire le futur... Nous en reparlerons au chapitre 15.

Mouvement au point zéro et soubresauts quantiques¹

Un petit récipient, peut-être d'un centimètre de long, est rempli d'atomes – des atomes d'hélium qui sont presque inertes – puis élevé à une forte température. Du fait de cette dernière, les particules filent de tous côtés, rebondissant sans cesse les unes sur les autres ainsi que sur les bords du récipient. Ce bombardement incessant crée une pression sur les parois.

Selon des critères usuels, les atomes se déplacent plutôt vite : leur vitesse moyenne est d'environ 1 500 mètres par seconde. Puis on refroidit le gaz. En même temps que la chaleur, l'énergie est évacuée et les atomes sont ralentis. Finalement, si nous continuons à extraire la chaleur, le gaz se refroidira jusqu'à la température la plus basse possible : le zéro absolu, soit environ $- 273$ °C. Les atomes ayant perdu toute leur énergie sont au repos et la pression sur les parois du récipient disparaît.

En tout cas, c'est ce à quoi *on s'attend*. Mais ce raisonnement ne tient pas compte du principe d'incertitude.

1. « Quantum jitters » dans le texte original, ce qu'on peut sobrement traduire par « fluctuations quantiques ». Mais l'expression est bien plus imagée et familière : *jitters*, c'est « la frousse », « les chocottes » et, par extension, « la tremblote ». Dans certains domaines, en informatique ou télécommunications, on traduit par « gigue ». Le choix qui a été fait ici est donc intermédiaire entre l'académique « fluctuations » et le familier « tremblote ». (N.d.T.)

Réfléchissez à ceci : que savons-nous de la position d'un atome dans ce cas précis ? Pas mal de choses en fait : chaque atome est confiné dans un récipient qui n'a qu'un centimètre de longueur. Il est donc évident que l'incertitude sur la position, Δx , est inférieure à un centimètre. Supposons un instant que tous les atomes se retrouvent vraiment au repos à mesure que la chaleur est évacuée. La vitesse de chaque atome devrait alors être nulle, sans aucune incertitude. En d'autres termes, Δv vaudrait zéro. Or c'est impossible : si c'était vrai, le produit $m \cdot \Delta x \cdot \Delta v$ serait nul lui aussi et zéro est sans conteste inférieur à la constante de Planck. Pour le dire autrement, si la vitesse d'un atome était nulle, l'incertitude sur sa position serait infinie. Ce qui n'est pas le cas. Les atomes sont dans le récipient. Ainsi, même au zéro absolu, le mouvement des atomes ne peut cesser complètement : ils continueront à rebondir sur les parois du récipient et à exercer une pression. C'est l'une des curiosités inattendues de la mécanique quantique.

Quand on a évacué d'un système toute l'énergie possible (quand la température est au zéro absolu), les physiciens disent qu'il est dans son *état fondamental*. Le mouvement résiduel variable dans cet état est d'ordinaire appelé *mouvement au point zéro*, mais le physicien Brian Greene a forgé un terme familier qui le décrit mieux : les « soubresauts quantiques ».

La position des particules n'est pas la seule chose qui fluctue. Pour la mécanique quantique, tout ce qui peut fluctuer le fait. Un autre exemple est donné par les champs électriques et magnétiques dans le vide. Les vibrations de ces champs sont partout présentes autour de nous, remplissant l'espace sous la forme d'ondes lumineuses. Même dans une pièce sombre, il y a des vibrations du champ électromagnétique : ondes infrarouges, micro-ondes, ondes radios. Mais que se passerait-il si nous rendions la pièce aussi sombre que la science nous le permet en en faisant partir tous les photons ? Les champs électrique et magnétique continueraient à avoir des soubresauts quantiques. Le « vide » est un territoire rempli de vibrations violentes, qui oscille, fluctue et ne peut jamais se tenir tranquille.

Avant même que les idées de la mécanique quantique n'effleurent quiconque, on connaissait les « soubresauts thermiques » qui font que tout fluctue. Par exemple, le fait de chauffer un gaz amplifie le mouvement aléatoire des molécules. Même le vide,

quand on le réchauffe, est rempli de champs électriques et magnétiques qui fluctuent. Cela n'a rien à voir avec la mécanique quantique et était connu depuis le XIX^e siècle.

Par certains aspects, les fluctuations quantiques et thermiques se ressemblent, par d'autres non. Les soubresauts thermiques sont très faciles à percevoir. Ceux des molécules et des champs électriques et magnétiques titillent vos terminaisons nerveuses et vous font ressentir de la chaleur. Ils peuvent être très destructeurs : par exemple, l'énergie des soubresauts thermiques des champs électriques peut être communiquée aux électrons des atomes. Si la température est suffisamment élevée, ces électrons peuvent même être arrachés. La même énergie pourrait vous brûler ou même vous vaporiser. À l'opposé, les fluctuations quantiques, quand bien même elles posséderaient une énergie incroyable, ne peuvent pas faire mal. Elles n'excitent pas vos terminaisons nerveuses et ne détruisent pas les atomes. Comment cela se fait-il ? Mettre un atome dans un état ionisé (en expulser des électrons) nécessite de l'énergie ; il en est de même pour exciter vos terminaisons nerveuses. Mais il n'y a aucune manière d'échanger de l'énergie à l'état fondamental. Les fluctuations quantiques sont ce qui reste dans un système possédant le niveau minimal absolu d'énergie. Bien qu'incroyablement violentes, les fluctuations quantiques n'ont rien des effets destructeurs de leurs homologues thermiques parce que leur énergie est « indisponible ».

Magie noire

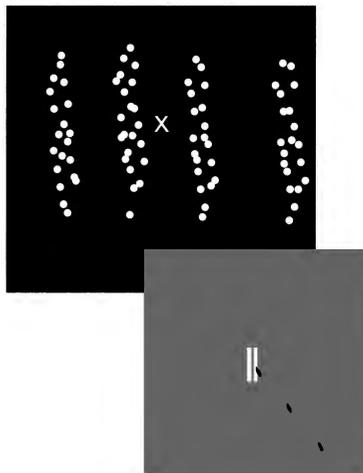
Ce qui me fait le plus l'effet d'étrangeté dans la mécanique quantique est la notion d'*interférence*. Revenons à l'expérience des deux fentes que j'ai décrite au début du présent chapitre. Trois éléments étaient en jeu : une source lumineuse, une plaque faisant obstruction avec deux petites fentes et un écran phosphorescent qui scintille quand il est percuté par la lumière.

Commençons par boucher la fente de gauche. Le résultat est une tache indistincte de lumière sur l'écran. Si nous diminuons l'intensité, nous pouvons voir que la tache est en fait un ensemble d'éclats, répartis au hasard, causés par les photons individuels. Les éclats sont imprédictibles mais, quand il y en a suffisamment, un dessin en forme de tache apparaît.



Si nous ouvrons la fente de gauche et fermons celle de droite, le dessin qui prend forme sur l'écran semble presque le même, décalé très légèrement vers la gauche.

La surprise arrive quand on ouvre les deux fentes à la fois. Au lieu de simplement additionner les photons de la fente de gauche à ceux de la fente de droite pour obtenir une tache plus intense mais toujours indistincte, on obtient un nouveau dessin en forme de zébrure.



Le plus curieux avec ce nouveau dessin est qu'il y a des bandes sombres où il n'y a aucun impact de photon, *quand bien même*

elles étaient remplies d'éclats dus à de tels impacts quand une seule fente était ouverte. Regardez le point marqué X sur la bande sombre du centre. Quand une seule fente est ouverte, des photons atteignent sans peine X en la traversant. On pourrait penser que, lorsque les deux fentes sont ouvertes, un nombre encore plus grand de photons parvient sur X. Mais ouvrir les deux fentes conduit à cet effet paradoxal que le flux des photons atteignant X est tari. Pourquoi le fait d'ouvrir les deux fentes rend-il moins probable qu'un photon se dirige sur X ?

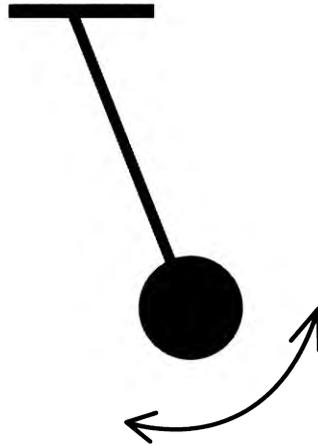
Imaginez une bande d'ivrognes prisonniers, titubant çà et là dans un donjon avec deux portes donnant sur l'extérieur. Le gardien fait bien attention à ne jamais laisser une des portes ouverte pour que quelques-uns des prisonniers, aussi ivres soient-ils, ne trouvent pas par accident le chemin de la sortie. Mais il ne craint pas du tout de laisser les deux portes ouvertes. Une mystérieuse magie empêche les ivrognes de s'échapper quand les deux portes sont ouvertes en même temps. Bien entendu, cela ne se produit pas avec des prisonniers réels, mais voilà le genre de choses que prédit parfois la mécanique quantique, non seulement pour les photons, mais pour toutes les particules.

Cela paraît curieux quand on pense à la lumière en termes de particules, mais c'est très banal avec les ondes. Les deux ondes, en quittant les deux fentes, se renforcent l'une l'autre en certains points et s'annulent en d'autres. Dans la théorie ondulatoire de la lumière, les bandes sombres viennent de cette annulation – on parle plutôt d'*interférence destructive*. Le seul problème est que la lumière apparaît vraiment quelquefois comme étant faite de particules.

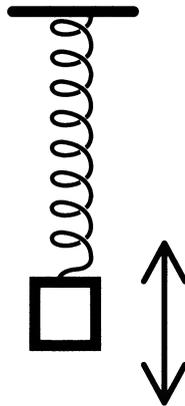
Quantum en mécanique quantique

Une onde électromagnétique est un exemple d'oscillation. Les champs électrique et magnétique vibrent en chaque point de l'espace avec une fréquence qui dépend de la couleur du rayonnement. Il y a bien d'autres phénomènes oscillatoires dans la nature. En voici quelques exemples ordinaires.

- Le pendule d'une horloge. Il balance de droite à gauche, une oscillation complète prenant environ une seconde. La fréquence d'un tel pendule est d'un hertz, ou une période par seconde.



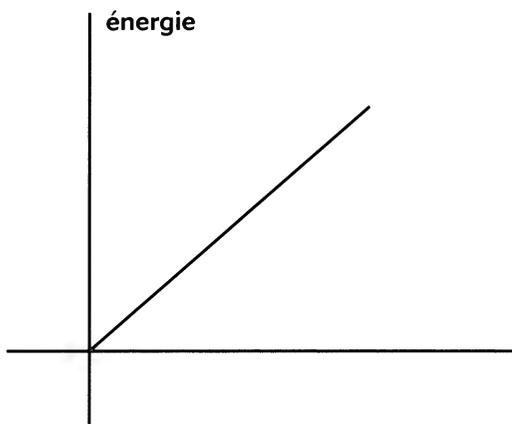
- Un poids suspendu au plafond par un ressort. Si ce dernier est très raide, la fréquence peut être de plusieurs hertz.



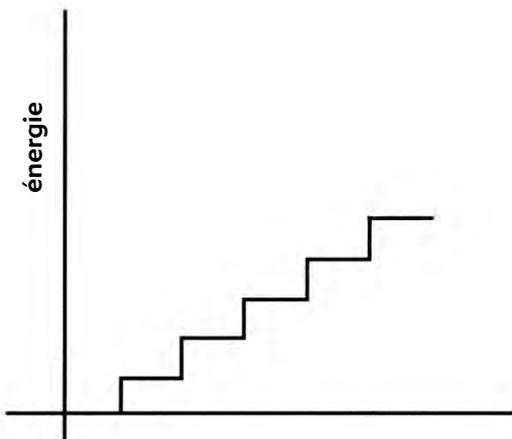
- Un diapason en train de vibrer, ou une corde de violon. Dans chacun des cas, on peut atteindre quelques centaines de hertz.
- Le courant électrique dans un circuit. Il peut osciller à des fréquences bien plus élevées.

C'est sans surprise qu'on appelle de tels systèmes oscillants des *oscillateurs*. Tous possèdent de l'énergie, du moins quand ils oscillent, et, en physique classique, celle-ci peut être quelconque. Je veux dire par là qu'il est possible de la faire s'accroître sans à-coup (peu à peu si vous préférez) jusqu'à n'importe quel niveau voulu. Une représentation graphique de la façon dont l'énergie

augmente au fur et à mesure que vous la faites s'accroître ressemblerait à quelque chose comme ceci :



Mais, en mécanique quantique, il apparaît que l'énergie arrive par petits paliers indivisibles. Quand vous tentez d'augmenter peu à peu l'énergie d'un oscillateur, le résultat est un escalier au lieu d'une rampe lisse. L'énergie ne peut augmenter que de multiples d'une unité appelée *quantum d'énergie*.



Quelle est la taille de ce quantum ? Cela dépend de la fréquence de l'oscillation. La règle est exactement la même que celle que Planck et Einstein ont découverte pour les quanta de lumière : le quantum d'énergie, E , s'obtient en multipliant la fréquence de l'oscillateur, f , par la constante de Planck, h .

$$E = hf$$

Pour des oscillateurs ordinaires comme un pendule, la fréquence n'est pas très grande : la hauteur de la marche (le quantum d'énergie) est donc extrêmement petite. Dans un tel cas, la courbe en escalier est faite de marches si minuscules qu'elle ressemble à une rampe lisse. Voilà pourquoi vous ne remarquerez jamais la *quantification de l'énergie* dans une expérience ordinaire. Par contre, les ondes électromagnétiques ont des fréquences très élevées : dans ce cas, les marches peuvent être assez hautes. En fait, comme vous l'avez peut-être déjà compris, faire grimper d'une marche l'énergie d'une onde électromagnétique est la même chose qu'ajouter un seul photon à un rayon lumineux.

Pour un cerveau programmé de façon classique, le fait que l'énergie ne puisse s'accroître que par quanta indivisibles semble illogique ; mais c'est là une conséquence de la mécanique quantique.

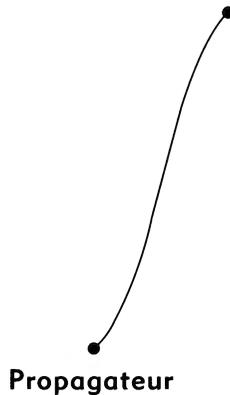
Théorie quantique des champs

Au XVIII^e siècle, l'idée que Laplace se faisait du monde était austère : des particules, rien que des particules se déplaçant sur les orbites immuables exigées par les équations despotiques de Newton. J'aimerais pouvoir dire que la physique d'aujourd'hui fournit une image moins acérée, plus chaleureuse, de la réalité, mais j'ai bien peur qu'il n'en soit rien : le monde n'est toujours que particules, avec certes une allure moderne. La loi d'airain du déterminisme a été remplacée par la loi arbitraire du hasard quantique.

Le cadre mathématique nouveau qui a pris la place des lois newtoniennes du mouvement s'appelle la théorie quantique des champs. Il impose à la nature de n'être que particules élémentaires se déplaçant d'un point à un autre, entrant en collision les unes avec les autres pour se séparer ou se joindre. C'est un vaste réseau de lignes d'univers reliant des événements (les points de l'espace-temps). Les mathématiques de cette toile d'araignée géante, faite de lignes et de points, ne sont pas faciles à expliquer aux profanes mais ses aspects essentiels sont assez clairs.

En physique classique, les particules se déplacent d'un point de l'espace-temps à un autre selon des trajectoires définies. La

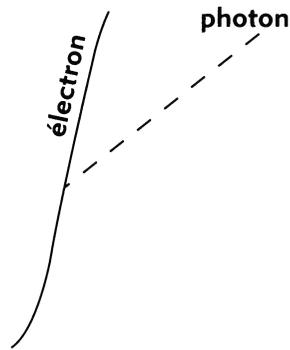
mécanique quantique introduit l'incertitude dans leur mouvement. Nous pouvons néanmoins imaginer les particules comme voyageant entre des points de l'espace-temps, quoique en suivant des trajectoires aléatoires. Ces trajectoires floues sont appelées *propagateurs*. Nous représentons habituellement chacun d'entre eux comme une ligne reliant deux événements de l'espace-temps, mais c'est seulement parce que nous n'avons aucun moyen de dessiner le caractère aléatoire du mouvement des particules quantiques de la réalité.



Viennent ensuite les interactions ; elles nous informent du comportement des particules quand elles se rencontrent. Le processus de base de l'interaction est appelé un *vertex* – un sommet. Un vertex est comme une fourche sur une route : une particule se déplace le long de sa ligne d'univers jusqu'à ce qu'elle parvienne à la fourche mais là, au lieu de choisir un chemin ou l'autre, elle se scinde en deux particules, une sur chaque branche. L'exemple le plus connu de vertex est l'émission d'un photon par une particule chargée. Un simple électron, spontanément, sans crier gare se scinde soudain en un électron et un photon¹. (Les lignes d'univers des photons sont traditionnellement représentées par des lignes ondulées ou pointillées.)

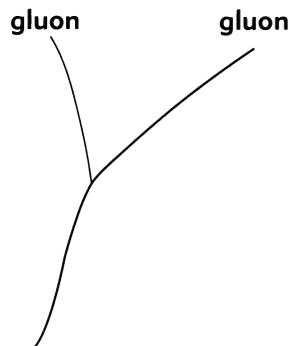
C'est là le procédé de base de production de la lumière : des électrons nerveux éjectant des photons.

1. Intuitivement, nous imaginons que, lorsqu'un objet se scinde, chaque partie est d'une certaine façon moindre que l'objet initial. C'est ce que nous dit l'expérience commune, celle dont nous avons hérité. La scission d'un électron en un autre électron plus un photon montre combien nos intuitions peuvent être trompeuses.



Photon
Vertex d'émission

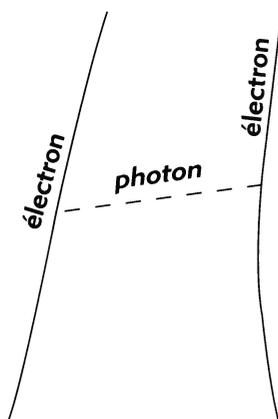
Il y a bien d'autres sortes de vertex d'interaction mettant en jeu d'autres particules. Certaines particules, appelées gluons, qu'on trouve à l'intérieur du noyau atomique, peuvent se scinder en deux gluons.



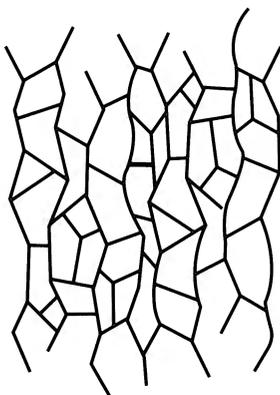
Vertex
d'émission de gluon

Si une chose peut se produire dans un sens, elle peut aussi se produire dans l'autre. Cela signifie que des particules peuvent se rejoindre et se fondre. Par exemple, deux gluons peuvent se joindre pour ne former qu'un seul gluon.

Richard Feynman nous a appris comment combiner propagateurs et vertex pour créer des processus plus complexes. Par exemple, voici un diagramme de Feynman montrant un photon sautant d'un électron à un autre, ce qui décrit la façon dont les électrons se heurtent et se repoussent.



Cet autre diagramme montre comment les gluons forment un matériau complexe, poisseux, visqueux qui maintient ensemble les quarks à l'intérieur du noyau.



La mécanique newtonienne cherche à répondre à la question séculaire de prédire le futur en prenant comme point de départ un ensemble donné de particules dont la position et la vitesse sont connues. La théorie quantique des champs pose la question autrement : étant donné un ensemble initial de particules se déplaçant d'une certaine façon, quelle est la probabilité d'obtenir tel ou tel résultat ?

Mais se contenter de dire que la nature est probabiliste et non déterministe ne clôt pas le sujet. Laplace, malgré qu'il en eût, aurait pu comprendre un monde comportant une part de hasard. Il aurait pu raisonner ainsi : le comportement des particules n'est pas

déterministe mais au moins y a-t-il une probabilité positive¹ pour chaque chemin conduisant du passé (deux électrons) au futur (deux électrons plus un photon). Ainsi, en suivant les règles du calcul des probabilités, Laplace aurait ajouté toutes les différentes probabilités pour obtenir la probabilité finale. Un tel raisonnement aurait eu un sens très clair pour un esprit tel que celui de Laplace, programmé de façon classique. Mais ce n'est pas ainsi que les choses se passent dans la réalité. La description correcte est bizarre : ne cherchez pas à la gnoquer – contentez-vous de l'accepter.

La loi exacte est une conséquence de cette nouvelle et étrange « logique quantique » découverte par le grand physicien anglais Paul Dirac tout de suite après les travaux de Heisenberg et Schrödinger. Feynman se rangeait derrière Dirac quand il a fourni une règle mathématique permettant de calculer une *amplitude de probabilités* pour chaque diagramme de Feynman. Pis, vous pouvez additionner les amplitudes de probabilité de tous les diagrammes mais cela ne vous donnera pas la probabilité finale. En fait, les amplitudes de probabilités ne sont pas nécessairement des nombres positifs mais peuvent être des nombres positifs, négatifs ou même complexes².

Mais l'amplitude de probabilité n'est pas la probabilité. Pour connaître la probabilité globale – par exemple la probabilité pour deux électrons de devenir deux électrons plus un photon –, vous devez d'abord additionner les amplitudes de probabilité de tous les diagrammes de Feynman. Puis, selon la logique quantique abstruse de Dirac, il vous faut élever le résultat *au carré* ! Le résultat est toujours positif : c'est la probabilité de cet événement particulier.

Telle est la règle étrange qui gît au cœur de la bizarrerie quantique. Pour Laplace, cela n'aurait été qu'absurdités et même Einstein n'y trouvait pas grand sens. Mais la théorie quantique des champs rend compte de manière incroyablement précise de tout ce que nous savons des particules élémentaires, y compris la façon dont elles s'agglutinent pour former les noyaux, les atomes et les molécules. Comme je l'ai dit dans l'introduction de ce livre, les

1. En calcul ordinaire des probabilités, ces dernières sont toujours des nombres positifs. On imagine difficilement ce que pourrait bien signifier une probabilité négative. Essayez donc de donner un sens à la phrase suivante : « Si je lance une pièce, la probabilité d'obtenir face est de $-1/3$ »... Cela ne voudrait visiblement rien dire.

2. Un nombre complexe est un nombre qui contient le nombre imaginaire figuré par i , symbole mathématique représentant la racine carrée de -1 .

physiciens quantiques ont dû se reprogrammer avec de nouvelles règles de logique¹.

Avant de clore ce chapitre, je voudrais revenir sur ce qui troublait si profondément Einstein. Je n'ai bien entendu aucune certitude, mais je soupçonne que cela avait à voir avec la nature au fond dénuée de sens des postulats probabilistes. J'ai toujours été perplexe devant ce que, en fin de compte, ils nous livrent du monde : pour autant que je puisse en juger, rien qui soit très précis. J'ai jadis écrit la très courte histoire qui suit – initialement incluse dans le livre de John Brockman, *What We Believe but Cannot Prove*, « Ce que nous croyons sans pouvoir le prouver » – et qui illustre cela. L'histoire, « Conversation avec un étudiant pas très vif », raconte une discussion entre un professeur de physique et un étudiant un peu bouché... Quand j'ai écrit l'histoire, je m'étais placé dans le rôle de l'étudiant et non du professeur...

L'étudiant – Eh, m'sieur ! J'ai un problème. J'ai décidé de faire une petite expérience de probabilité – vous savez bien, la pièce qu'on lance – et vérifier une chose ou deux que vous nous avez enseignées. Mais ça ne marche pas.

Le professeur – Eh bien, je suis heureux de voir que cela vous intéresse. Qu'avez-vous fait ?

L'étudiant – J'ai lancé la pièce en l'air 1 000 fois. Vous vous rappelez, vous nous avez dit que la probabilité de tomber sur face est de un demi. Je me disais que si je lançais la pièce 1 000 fois, je devais m'attendre à obtenir 500 fois face. Mais ça n'a pas marché : j'en ai obtenu 513. Qu'est-ce qui cloche ?

Le professeur – Ouais... Mais vous n'avez pas tenu compte de la marge d'erreur. Si vous lancez la pièce un certain nombre de fois, elle représente environ la racine carrée du nombre de lancers. Pour 1 000 lancers, ça fait environ 30. Vous êtes donc bien en dessous de la marge d'erreur.

L'étudiant – Ça y est, j'ai compris ! Chaque fois que je fais 1 000 lancers, j'obtiens toujours quelque chose entre 470 et 530 faces. À tous les coups ! Super ! Ça au moins c'est du sûr !

Le professeur – Attendez ! Ce que cela signifie est que vous en obtiendrez *probablement* entre 470 et 530.

L'étudiant – Vous voulez dire que je pourrais obtenir 200 faces ? Ou 850 ? Ou même que des faces ?

1. Je n'attends pas vraiment du lecteur profane une compréhension complète de ces règles, ni d'ailleurs qu'il perçoive en quoi elles sont si étranges. Mais j'espère que tout cela aura donné une idée de la façon dont les lois de la théorie quantique des champs fonctionnent.

Le professeur – Probablement pas.

L'étudiant – Ça doit venir de ce que je n'ai pas fait assez de lancers. Si je rentre chez moi et en fais 1 000 000, ça marchera mieux ?

Le professeur – Probablement.

L'étudiant – Vous rigolez, m'sieur ! Dites-moi quelque chose de sûr ! Tout ce que vous faites est de m'expliquer ce que veut dire *probablement* en m'assénant d'autres *probablement*... Dites-moi ce que veut dire probablement sans employer le mot probablement !

Le professeur – Humm... Que pensez-vous de ceci : cela signifie que je serais surpris si la réponse était en dehors de la marge d'erreur.

L'étudiant – Bon sang ! Vous êtes en train de me dire que tout ce que vous nous avez raconté sur la mécanique statistique et la mécanique quantique en passant par le calcul des probabilités se ramène au fait que vous seriez personnellement surpris si ça ne marchait pas ?

Le professeur – Eh bien... Si je lançais une pièce en l'air un million de fois, je voudrais bien être damné si je n'obtiens que des faces ! Je n'aime pas parier mais là je mets ma main à couper. Je suis même prêt à parier un an de salaire. Je suis absolument certain que les lois des grands nombres – la théorie des probabilités – fonctionneront et me protégeront. Toute la science s'appuie là-dessus. Mais je ne peux pas le prouver et je ne sais même pas pourquoi il en est ainsi. C'est peut-être pour cela qu'Einstein disait que « Dieu ne joue pas aux dés ». Probablement pour cela.

De temps en temps, on voit des physiciens dire qu'Einstein ne comprenait pas la mécanique quantique et a donc perdu son temps avec des théories classiques naïves. J'ai les plus grands doutes qu'il en ait été ainsi. Ses arguments contre la mécanique quantique étaient extrêmement subtils et ont culminé avec un des articles les plus profonds, et les plus cités, de toute la physique¹. Ce que je crois, c'est qu'Einstein était troublé par cela même qui perturbait notre étudiant bouché. Comment se peut-il que la théorie ultime du réel ne soit rien de plus concret que notre propre degré de surprise devant le résultat d'une expérience ?

Je vous ai montré quelques-uns des aspects paradoxaux, à la limite de l'illogique, que la mécanique quantique impose à un esprit programmé de façon classique. Je me doute que cela ne vous

1. A. Einstein, B. Podolsky et N. Rosen : « *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete* » (La description que donne la mécanique quantique peut-elle être considérée comme l'expression ultime de la réalité), *Physical Review* 47 (1935) : 777–80.

satisfait pas pleinement. Je l'espère bien, d'ailleurs ! Si vous ressentez de la confusion, c'est normal ! Le seul vrai remède serait de vous prescrire de faire du calcul et de plonger dans un bon manuel de mécanique quantique pendant quelques mois... Seul un véritable mutant, ou quelqu'un qui a été élevé dans une famille très étrange, pourrait être naturellement programmé pour comprendre la mécanique quantique. Rappelez-vous : en fin de compte, même Einstein ne pouvait pas la gnoquer...

Les nouvelles unités de mesure de Planck

Un jour, à la cafétéria de Stanford, je remarquai un certain nombre d'étudiants suivant mon cours de physique pour les « première année » de médecine en train de travailler à une table. Je leur demandai : « Alors, les gars, qu'est-ce que vous êtes en train d'étudier ? » La réponse me surprit : ils étaient en train de mémoriser jusqu'à la dernière décimale la table des constantes figurant sur la couverture de leur manuel¹. Il y avait là les constantes suivantes, en plus d'une vingtaine d'autres :

h (constante de Planck) : $6,626\ 068 \times 10^{-34}$ m² kg s⁻¹

Nombre d'Avogadro : $6,022\ 141\ 5 \times 10^{23}$

Charge de l'électron : $1,602\ 176\ 46 \times 10^{-19}$ coulombs

c (vitesse de la lumière) : $299,792\ 458$ m s⁻¹

Diamètre du proton : $1,724 \times 10^{-15}$ m

G (constante de Newton) : $6,674\ 2 \times 10^{-11}$ m³ kg⁻¹ s⁻²

Les étudiants en première année de médecine sont entraînés à mémoriser une quantité invraisemblable de choses dans les autres cours de science. Ce sont de bons étudiants en physique mais ils s'efforcent souvent d'apprendre comme ils le font pour la physiologie. Mais la physique ne nécessite qu'un très petit travail de mémoire. Je ne pense pas que la plupart des médecins pourraient donner plus que des ordres de grandeur grossiers de ces constantes.

Cela fait surgir une question intéressante : pourquoi des nombres si compliqués pour les constantes de la nature ? Pour-

1. Toutes les constantes sont exprimées dans le système métrique standard : mètres (m), kilogrammes (kg) et secondes (s).

quoi pas des nombres simples comme 2,5 ou même 1 ? Pourquoi sont-ils toujours si petits (constante de Planck, charge de l'électron) ou au contraire si grands (nombre d'Avogadro, vitesse de la lumière) ?

La réponse n'a pas grand-chose à voir avec la physique mais bien plus avec la biologie... Prenons le nombre d'Avogadro. Il représente le nombre de molécules contenues dans une certaine quantité de gaz. Laquelle ? Une quantité que les chimistes du début du XIX^e siècle pouvaient aisément manipuler. En d'autres termes, une quantité de gaz pouvant tenir dans un béccher ou n'importe quel autre récipient à taille plus ou moins humaine. La valeur numérique exacte du nombre d'Avogadro a plus de rapport avec le nombre de molécules qu'il y a dans un être humain qu'avec quelque loi profonde de la physique¹...

Le diamètre du proton est un autre exemple : pourquoi donc est-il si petit ? Une nouvelle fois, la clef est dans la physiologie humaine. La valeur numérique de la table est exprimée en mètres, mais qu'est-ce que le mètre ? C'est la version système métrique du yard anglais qui aurait représenté la distance allant, chez un homme, du nez au bout des doigts tendus. Il s'agissait sans doute d'une unité commode pour tailler un vêtement ou mesurer une corde. Si la petitesse du proton nous enseigne quelque chose, c'est tout simplement qu'il faut beaucoup de protons pour former un bras humain ! Du point de vue de la physique fondamentale, ce nombre n'a rien de particulier.

Pourquoi donc ne changeons-nous pas nos unités pour rendre ces nombres plus faciles à retenir ? En réalité, nous le faisons souvent ! Par exemple, en astronomie, l'année-lumière est utilisée comme mesure des distances. (Je déteste quand j'entends l'année-lumière improprement utilisée comme unité de temps, comme dans : « Ça alors : ça fait bien une année-lumière qu'on ne s'est vus ! ») La vitesse de la lumière n'est pas si grande quand on l'exprime en années-lumière par seconde. Elle est même très petite – seulement de l'ordre de 3×10^{-8} . Que se passerait-il si l'on passait en même temps des secondes aux années pour mesurer le temps ? Comme il faut exactement un an à la lumière pour par-

1. Mais pourquoi les êtres humains ont-ils tant de molécules ? Là encore, cela a plus à voir avec la nature de la vie intelligente qu'avec la physique fondamentale. Il faut un grand nombre de molécules pour fabriquer une machine suffisamment complexe pour penser, et poser des questions de chimie...

courir une année-lumière, la vitesse de la lumière est d'une année-lumière par an.

La vitesse de la lumière est une des grandeurs les plus importantes en physique : cela justifie d'utiliser des unités dans lesquelles c vaut un. Mais le rayon du proton n'est pas particulièrement fondamental. Les protons sont des objets complexes faits de quarks et autres particules, alors pourquoi leur donner la place d'honneur ? Cela aurait plus de sens de prendre les constantes qui contrôlent les lois les plus profondes et universelles de la physique. Il n'y a pas de controverse sur les lois en question :

- Dans l'univers, la vitesse maximale de *tout* objet est celle de la lumière. Cette limite ne concerne pas seulement la lumière mais *tout* ce qui est dans la nature.
- Dans l'univers, *tous* les corps s'attirent les uns les autres avec une force égale au produit de leurs masses, divisé par le carré de leur distance, par la constante de Newton, G . Et *tous*, cela veut dire *tous*, sans aucune exception.
- Pour *n'importe quel* corps dans l'univers, le produit de sa masse par les incertitudes de sa position et de sa vitesse est toujours supérieur à la constante de Planck, h .

Les italiques ont été utilisés pour insister sur le caractère global de ces lois. Elles s'appliquent aux corps, à *chacun* et à *tous* : en fait, elles s'appliquent à *tout* ! Ces trois lois de la nature méritent vraiment d'être qualifiées d'universelles, bien plus que les lois de la physique nucléaire ou les propriétés de n'importe quelle particule spécifique comme le proton. Cela peut paraître sans intérêt mais, en 1900, une des idées les plus profondes sur la structure de la physique est apparue quand Max Planck s'est rendu compte que les unités spécifiques de longueur, de masse et de temps pouvaient être choisies pour rendre les trois constantes de base – c , G et h – toutes égales à un.

La base est l'unité de longueur de Planck. Cette dernière est bien plus petite que le mètre ou même le diamètre du proton. En fait, elle est environ cent milliards de milliards de fois plus petite qu'un proton (en mètres, cela fait environ 10^{-35}). Même si l'on grossissait le proton jusqu'à la taille du système solaire, la longueur de Planck ne serait pas plus grande qu'un virus. Il restera pour toujours au crédit de Planck de s'être rendu compte que des dimensions aussi incroyablement minuscules doivent jouer un rôle

crucial dans toute théorie fondamentale du monde physique. Il ne savait pas quel pourrait être ce rôle mais il se pourrait bien qu'il ait soupçonné que les plus petites briques de matière aient la « longueur de Planck ».

L'unité de temps dont Planck avait besoin pour faire que c , G et h soient égaux à 1 était, elle aussi, extraordinairement petite – en l'occurrence 10^{-42} seconde, le temps qu'il faut à la lumière pour parcourir la longueur de Planck.

Enfin, il y a une unité de masse de Planck. Du fait que la longueur et le temps de Planck sont si incroyablement petits (dans les unités ordinaires, celles qui font la part belle au vivant), on s'attendrait à ce que l'unité de masse de Planck soit bien plus petite que la masse de tout objet ordinaire. Mais on aurait tort. Il se trouve que la plus fondamentale des unités de masse en physique n'est pas extrêmement petite dans l'échelle du vivant : en gros la masse de dix millions de bactéries. À peu près la même chose que la masse du plus petit objet qui peut être vu à l'œil nu : un grain de poussière, par exemple.

Ces unités – la longueur, le temps et la masse de Planck – ont une signification remarquable : elles représentent la taille, la demi-vie et la masse du plus petit trou noir possible. Nous reviendrons là-dessus dans des chapitres ultérieurs.

$$E = mc^2$$

Prenez une casserole, remplissez-la de cubes de glace, couvrez-la hermétiquement avant de la peser sur une balance de cuisine. Posez-la ensuite sur le fourneau et laissez la glace fondre et se transformer en eau chaude. Pesez à nouveau. Si vous le faites avec minutie, en veillant à ce que rien n'entre ni ne s'échappe de la casserole, le poids final aura la même valeur qu'au départ, du moins avec une très grande précision. Mais s'il était possible d'effectuer les mesures au millionième de millionième, on constaterait un écart : l'eau chaude pèserait légèrement plus que la glace. Pour le dire autrement, le réchauffement ajoute quelques millionnièmes de millionième de kilogramme au poids.

Qu'est-ce qui peut bien se passer ici ? Eh bien, la chaleur, c'est de l'énergie. Mais, d'après Einstein, l'énergie, c'est de la masse et donc augmenter l'énergie du contenu du récipient en accroît la

masse. La fameuse équation d'Einstein $E = mc^2$ traduit le fait que masse et énergie sont une seule et même chose mais mesurée dans des unités différentes. D'une certaine façon, c'est un peu comme convertir des miles en kilomètres : la distance en kilomètres est 1,61 fois la distance en miles. Dans le cas de la masse et de l'énergie, le facteur de conversion est le carré de la vitesse de la lumière.

L'unité d'énergie standard des physiciens est le joule. Cent joules représentent l'énergie nécessaire pour faire briller une ampoule de 100 watts pendant une seconde. Un joule est l'énergie cinétique d'une masse d'un kilogramme se déplaçant à la vitesse d'un mètre par seconde. Votre nourriture quotidienne vous apporte une énergie d'environ dix millions de joules. Quant au kilogramme, c'est l'unité internationale standard de masse.

Ce dont $E = mc^2$ nous informe est que masse et énergie sont des concepts interchangeable. Un peu de masse qui disparaîtrait serait transformée en énergie – le plus souvent sous forme de chaleur, mais ce n'est pas obligatoire. Imaginons la disparition d'une masse d'un kilogramme et son remplacement par de la chaleur. Pour savoir combien de chaleur, il faut multiplier ce kilogramme unique par le très grand nombre c^2 . Cela donne environ 10^{17} joules. Ce qui vous suffirait pour vivre trente millions d'années, ou alors vous pourriez fabriquer une très grosse bombe atomique. Par bonheur, il est très difficile de transformer une masse en d'autres formes d'énergie mais – ainsi que le Projet Manhattan¹ l'a montré – c'est faisable.

Pour les physiciens, les concepts de masse et d'énergie sont devenus si proches que nous prenons rarement la peine de les distinguer. Par exemple, la masse de l'électron est souvent représentée par un certain nombre d'*électrons-volts*, l'électron-volt étant une unité d'énergie commode en physique atomique.

Munis de ces connaissances, revenons-en à la masse de Planck – la masse d'un grain de poussière –, que nous pourrions tout aussi bien appeler l'énergie de Planck. Imaginez que le grain soit transformé en énergie thermique grâce à quelque nouvelle découverte. L'énergie serait en gros celle qui est contenue dans un plein d'essence : vous pourriez traverser les États-Unis de part en part avec dix masses de Planck.

1. Il s'agissait du projet de construction de la bombe atomique à Los Alamos, dans l'État du Nouveau-Mexique, pendant la Seconde Guerre mondiale.

La petitesse inimaginable des objets à l'échelle de Planck et les difficultés invraisemblables de jamais pouvoir les observer directement sont sources de frustration profonde pour les physiciens théoriciens. Le simple fait que nous en savons assez pour seulement nous poser de telles questions est un triomphe de l'imagination humaine. Pourtant, c'est ce monde lointain qu'il va nous falloir examiner pour trouver la clef des paradoxes des trous noirs : l'horizon d'un trou noir est tapissé d'un réseau serré de *bits d'information*, de bribes d'informations à l'échelle de Planck. En fait, l'horizon d'un trou noir est la forme la plus concentrée d'information que les lois de la nature permettent. Nous verrons plus loin ce qu'on entend par *information* et son concept jumeau, *l'entropie*. Nous serons alors suffisamment armés pour comprendre tout ce qu'a représenté la guerre du trou noir. Mais tout d'abord je voudrais expliquer en quoi la mécanique quantique sape l'une des conclusions les plus solides de la relativité générale : la nature éternelle des trous noirs.

Dans un bar de Broadway

La première conversation que j'ai eue avec Richard Feynman a eu lieu au West End Café, sur Broadway, dans le haut de Manhattan. C'était en 1972. J'étais un physicien à peu près inconnu de trente-deux ans, Feynman en avait cinquante-trois. Même s'il n'était plus en pleine possession de ses moyens, le lion vieillissant restait un personnage imposant. Feynman était venu à l'université de Columbia pour donner une conférence sur sa théorie nouvelle sur les partons. *Parton* était le mot employé par Feynman pour les constituants hypothétiques (les parties) des particules subnucléaires comme les protons, les neutrons et les mésons. Nous les appelons aujourd'hui quarks et gluons.

À cette époque, la ville de New York était un centre de premier plan en physique des hautes énergies. Le foyer en était le département de physique de Columbia. La physique à Columbia a eu une histoire remarquable et prestigieuse. I. I. Rabi, un des pionniers de la physique américaine, en avait fait un des établissements parmi les plus prestigieux du monde. Mais, en 1972, la réputation de Columbia était sur le déclin. Le programme de physique théorique de la Belfer Graduate School of Science de la Yeshiva University où j'enseignais était au moins aussi bon. Mais Columbia était Columbia, et Belfer était, de loin, moins cotée.

On savourait par avance dans l'enthousiasme la conférence de Feynman : il avait une place tout à fait à part dans le cœur et l'esprit des physiciens. Non seulement il était un des plus grands théoriciens de la physique de tous les temps mais chacun pouvait le prendre pour héros : acteur, clown, batteur, mauvais garçon, iconoclaste, géant intellectuel – il faisait en sorte que tout paraisse

simple. N'importe qui d'autre aurait bataillé pendant des heures avec des calculs compliqués pour répondre à une question de physique ; cela prenait vingt secondes à Feynman pour vous expliquer pourquoi la réponse était évidente.

Il avait un ego gargantuesque mais c'était un vrai plaisir de le côtoyer. Nous sommes devenus bons amis quelques années plus tard mais, en 1972, lui était une célébrité et moi un plouc du nord de la 181^e rue, regardant béatement les idoles devant l'entrée des artistes... Je suis arrivé à Columbia en métro, deux heures avant la conférence, dans l'espoir d'échanger quelques mots avec le grand homme.

Le département de physique théorique était au huitième étage du Pupin Hall. Je pensais que Feynman traînerait par là. La première personne que je rencontrai fut T. D. Lee, le grand pontife de la physique à Columbia. Je lui demandai si Feynman était par là. La réponse de Lee fut un chaleureux « Qu'est-ce que vous voulez ? »... « Eh bien, je voudrais lui poser une question sur les partons. » « Il est occupé. » Fin de la conversation.

Cela aurait été aussi la fin de l'histoire sans les besoins naturels... En entrant dans les toilettes, j'ai vu Dick devant un urinoir. Me glissant à côté de lui, je lançai : « Professeur Feynman, puis-je vous poser une question ? – Ouais... Mais laissez-moi d'abord finir ce que je fais et nous pourrons ensuite aller dans le bureau où ils m'ont mis. C'est à propos de quoi ? » À ce moment précis, je me suis dit que je n'avais pas vraiment de question sur les partons mais que je pouvais en concocter une sur les trous noirs.

L'expression *trou noir* avait été inventée par John Wheeler quatre ans plus tôt. Wheeler avait été le patron de thèse de Feynman, mais ce dernier me répondit qu'il ne savait pratiquement rien sur les trous noirs. Le peu que je savais, je le tenais de mon ami David Finkelstein, un des pionniers de la physique des trous noirs. En 1958, Dave avait écrit un article qui fit date où il expliquait que l'horizon d'un trou noir était un point de non-retour. Dans mes bribes de connaissance, il y avait le fait qu'une singularité occupait le centre d'un trou noir et était entourée d'un horizon. Dave m'avait aussi expliqué pourquoi, au-delà de l'horizon, rien ne pouvait s'échapper. Ultime connaissance, bien que je n'arrive pas à me souvenir d'où je la tenais, le fait qu'une fois formé un trou noir ne peut se diviser ou disparaître. Deux trous noirs, ou plus, peuvent fusionner pour former un plus gros trou noir, mais rien ne peut

faire qu'un trou noir se divise en deux trous noirs ou plus. Autrement dit, une fois qu'un trou noir s'est formé, plus moyen de s'en débarrasser.

À peu près à la même époque, le jeune Stephen Hawking était en train de révolutionner la théorie classique des trous noirs. Parmi ses découvertes les plus importantes, il y avait le fait que l'aire de l'horizon d'un trou noir ne peut jamais diminuer. Stephen, avec ses collaborateurs James Bardeen et Brandon Carter, avait tiré de la théorie de la relativité générale un ensemble de lois régissant le comportement des trous noirs. Ces lois avaient une ressemblance troublante avec celles de la thermodynamique (les lois de la chaleur), mais on pensait que cette ressemblance était une coïncidence. La règle disant que l'aire ne diminue jamais était l'analogue de la deuxième loi de la thermodynamique qui stipule que l'entropie d'un système ne peut jamais diminuer. Je ne crois pas que je connaissais ces travaux, ni même le nom de Stephen Hawking, à l'époque de la conférence de Feynman, mais les lois de Stephen sur la dynamique des trous noirs auront eu, en fin de compte, une importance capitale sur mes recherches pendant plus de vingt ans.

Quoi qu'il en soit, ce que je voulais demander à Feynman était si la mécanique quantique pouvait faire qu'un trou noir se désintègre en se brisant en plusieurs trous noirs plus petits. J'imaginai quelque chose d'analogue à la fragmentation d'un très gros noyau en noyaux plus petits. Je lui expliquai précipitamment pourquoi je pensais que cela devait se produire.

Feynman répondit qu'il n'y avait jamais réfléchi. Qui plus est, il en était venu à prendre en aversion la gravité quantique. Les effets de la mécanique quantique sur la gravité, ou de la gravité sur la mécanique quantique, étaient tout simplement trop infimes pour jamais pouvoir être mesurés. Ce n'est pas qu'il croyait le sujet inintéressant en soi mais, sans effets mesurables par l'expérience pour guider la théorie, il n'y avait aucun espoir de deviner comment tout cela fonctionnait vraiment. Il y avait réfléchi des années plus tôt et ne comptait pas recommencer. Il pensait qu'il faudrait peut-être cinq siècles avant qu'on ne comprenne la gravité quantique. Toujours est-il, conclut-il, qu'il avait une conférence à donner dans une heure et avait besoin de se détendre.

La conférence a été du pur Feynman. Il remplissait la scène de sa présence : c'était un personnage hors du commun avec son accent de Brooklyn et les attitudes qu'il prenait pour illustrer

chacun de ses propos. L'auditoire était envoûté. Il nous montra comment nous poser les questions difficiles de la théorie quantique des champs d'une manière simple et intuitive. En dehors de lui, pratiquement tout le monde utilisait une autre méthode, plus ancienne, pour analyser les problèmes qu'il abordait. Cette méthode antérieure était plus difficile, mais il avait trouvé une astuce qui simplifiait tout : l'astuce des partons. Feynman agita sa baguette magique et toutes les réponses jaillirent. Comble d'ironie, la méthode plus ancienne s'appuyait sur les diagrammes de Feynman !

À mes yeux, le meilleur moment de la conférence fut lorsque T. D. Lee l'interrompit pour poser une question – ou, plutôt, pour lancer une affirmation déguisée en question. Feynman avait dit que certains types de diagrammes n'apparaissaient jamais avec sa nouvelle méthode, ce qui simplifiait les choses. On les appelait des diagrammes Z. Lee demanda : « N'est-il pas vrai que, dans certaines théories où interviennent des champs de vecteurs et de spineurs¹, les diagrammes Z ne donnent pas toujours zéro ? Mais je pense qu'on doit pouvoir arranger ça. » La salle de conférences était plongée dans un silence sépulcral. Feynman regarda le grand ponton pendant quelques secondes et lança : « Eh bien, arrangez ça ! » Et il enchaîna.

À la fin de la conférence, Feynman se dirigea vers moi et me demanda : « Hé ! Comment vous appelez-vous ? » Il m'expliqua qu'il avait repensé à ma question et voulait en parler. Est-ce que je connaissais un endroit où nous retrouver plus tard ? Voilà comment nous avons fini au West End Café.

Nous allons y retourner mais, auparavant, il me faut vous mettre au courant de quelques points supplémentaires sur la gravité et la mécanique quantique.

Ce dont je veux parler a un rapport avec les effets de la mécanique quantique sur les trous noirs. La théorie de la relativité générale est une théorie classique de la gravitation. Quand un physicien utilise le mot *classique*, cela ne veut pas dire qu'il parle de la Grèce antique : cela signifie simplement que la théorie ne tient pas compte des effets quantiques. Très peu de choses étaient comprises sur la façon dont la théorie quantique pouvait influencer sur le champ gravitationnel mais ce peu avait un rapport avec de petites pertur-

1. Formalisme introduit par Pauli et Dirac en mécanique quantique. (N.d.E.)

bations se propageant à travers l'espace comme des *ondes gravitationnelles*. Feynman avait apporté une contribution à la plupart des choses que nous connaissons sur la théorie quantique de ces perturbations.

Au chapitre 4, nous avons vu que Dieu ne prêtait apparemment pas attention au jeu de dés d'Einstein. Ce dont il s'agit, bien sûr, est que les certitudes de la physique classique deviennent aléas en physique quantique. La mécanique quantique ne nous dit jamais ce qui va arriver : elle nous dit avec quelle probabilité tel ou tel événement se produira. L'instant précis où un atome radioactif va se désintégrer ne peut être prédit ; mais la mécanique quantique peut nous dire qu'il va probablement le faire dans les dix prochaines secondes.

Le physicien, lauréat du prix Nobel, Murray Gell-Mann, a emprunté le slogan suivant à *La Quête du roi Arthur* de T. H. White¹ : « Tout ce qui n'est pas interdit est obligatoire ! » En particulier, il y a de nombreux événements qui, en physique classique, ne peuvent tout bonnement pas se produire. Dans la plupart des cas, ils sont possibles dans la théorie quantique : au lieu d'être impossibles, ils sont simplement très improbables. Mais peu importe qu'ils soient improbables, à condition d'attendre suffisamment longtemps, ils finiront par arriver. Ainsi, tout ce qui n'est pas interdit est obligatoire.

Un bon exemple est le phénomène appelé *effet tunnel*. Imaginez une voiture garée au creux d'une colline.



1. *The Once and Future King*, de l'écrivain anglais Terence Hanbury White, a été écrit à la fin des années 1930. Par le biais de la fantaisie, il cherchait à dénoncer les régimes fasciste et nazi. Les deux volets du livre sont connus en France sous les titres : *Excalibur, l'épée dans la pierre* et *La Sorcière de la forêt*. Le premier a été rendu célèbre par Walt Disney qui en a fait son *Merlin l'Enchanteur* en 1963. (N.d.T.)

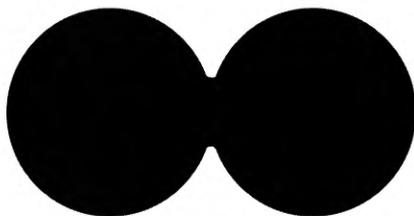
Laissons de côté tout ce qui n'a aucun rapport comme les frottements ou la résistance de l'air. Supposons en outre que le conducteur n'a pas mis le frein à main et que le véhicule est donc à même de rouler. Il est clair que, si la voiture est garée en bas du creux, elle ne va pas brusquement se mettre à bouger. Un mouvement dans quelque direction que ce soit signifierait aller vers le haut et, si, au départ, la voiture est au repos, elle n'aura pas l'énergie pour se déplacer vers le haut. Si, plus tard, nous la retrouvons en train de descendre la colline de l'autre côté de la bosse, nous en concluons soit que quelqu'un l'a poussée soit qu'elle a reçu l'énergie nécessaire pour dépasser la bosse d'une autre façon. Sauter par-dessus la bosse spontanément est une impossibilité en mécanique classique.

Mais rappelez-vous : tout ce qui n'est pas interdit est obligatoire. Si la voiture était quantique (comme le sont en réalité toutes les voitures), rien ne l'empêcherait d'apparaître brusquement de l'autre côté de la bosse. Cela peut être très peu probable – et, pour un objet aussi grand et lourd qu'une voiture, ce serait très, *très* improbable – mais pas impossible. Et donc, avec suffisamment de temps, cela arriverait obligatoirement. Si nous attendions suffisamment longtemps, nous trouverions notre voiture roulant vers le bas de la colline de l'autre côté de la bosse. Ce phénomène est appelé *effet tunnel* parce que tout se passe comme si la voiture était passée sous la bosse, à travers un tunnel.

L'effet tunnel pour un objet aussi lourd qu'une voiture est extrêmement peu probable. Il faudrait une durée très longue avant qu'elle ne réapparaisse de l'autre côté de la bosse. Écrire un nombre suffisamment grand pour exprimer cette durée nécessiterait tant de chiffres que, même si chacun d'entre eux avait la taille d'un proton et qu'on les serrait étroitement les uns aux autres, cela occuperait un espace plus grand que l'univers. Mais le même effet tunnel peut permettre à une particule alpha (deux protons et deux neutrons) de sortir d'un noyau, ou à un électron de traverser une barrière dans un circuit.

Ce que j'avais en tête en ce jour de 1972 était que, même si les trous noirs classiques ont une forme fixe, les fluctuations quantiques pouvaient agiter la forme de leur horizon. Normalement, la forme d'un trou noir qui n'est pas en rotation est une sphère parfaite. Mais une fluctuation quantique devrait être capable de la déformer pendant un court instant en quelque chose d'aplati ou

allongé. En outre, il se peut que, de temps à autre, la fluctuation soit si grande que la déformation fasse du trou noir quasiment une paire de deux sphères plus petites reliées par un col mince. À partir de là, il lui est facile de se diviser. C'est de cette façon que les noyaux lourds le font, alors pourquoi pas un trou noir ? D'un point de vue classique, cela ne peut pas se produire, pour les mêmes raisons que la voiture ne peut pas spontanément sauter par-dessus la bosse. Mais est-ce une interdiction absolue ? Je ne voyais aucune raison pour qu'il en soit ainsi. Je me disais : attendons suffisamment longtemps, et le trou noir se scindera en deux trous noirs plus petits.



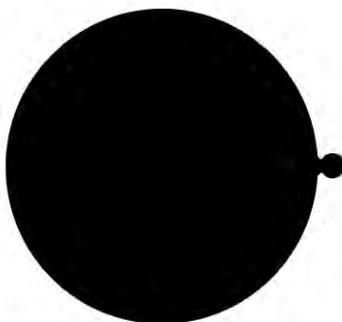
Mon idée sur la façon dont un trou noir se scinde

Il est temps de retourner au West End Café. J'y étais installé depuis une demi-heure pour attendre Feynman en sirotant une bière. Plus j'y pensais, plus tout cela me paraissait sensé. Un trou noir pourrait se désintégrer par effet tunnel, d'abord en deux, puis en quatre, huit et, en fin de compte, en un grand nombre de composants microscopiques. À la lumière de la mécanique quantique, cela n'avait aucun sens de penser que les trous noirs étaient permanents.

Feynman entra dans le café avec juste une ou deux minutes d'avance et se dirigea vers l'endroit où j'étais assis. Je me sentais très grand seigneur et commandai deux bières. Avant même que je ne puisse faire un geste, Feynman sortit son porte-monnaie et paya. Je ne sais pas s'il a laissé un pourboire. J'ai bu ma bière à petites gorgées mais remarquai que Feynman ne toucha pas à son verre. Je commençai en déroulant mon raisonnement et finis en expliquant que je pensais qu'un trou noir devait, en fin de compte, se désintégrer en minuscules morceaux. De quelle nature ? Bien qu'implicite, la seule réponse raisonnable était en particules élémentaires telles que photons, électrons et positrons.

Feynman approuvait le fait que rien ne s'opposait à ce que cela arrive mais pensait que la représentation que je m'en faisais était incorrecte. J'imaginai la première scission du trou noir en deux morceaux plus ou moins de la même taille. Chacun se scindant à son tour en deux moitiés jusqu'à obtenir des fragments microscopiques.

Le problème venait du fait qu'il aurait fallu une fluctuation quantique gigantesque pour qu'un trou noir se divise par moitiés. Feynman pensait qu'il y avait une représentation plus plausible dans laquelle l'horizon se scinderait d'une part en un morceau sensiblement de la même taille que l'horizon de départ et, d'autre part, en un fragment microscopique qui s'échapperait. Au fur et à mesure, le gros trou noir deviendrait de plus en plus petit jusqu'à ce qu'il n'en reste rien. Ça paraissait juste. Un minuscule morceau de l'horizon se détachant, cela paraissait bien plus probable qu'un trou noir se scindant en deux gros morceaux.



L'idée de Feynman sur la façon dont un trou noir se scinde.

La conversation dura environ une heure. Je ne me rappelle pas que nous nous soyons dit « à bientôt » ni que nous ayons prévu de creuser l'idée. J'avais rencontré le lion : il ne m'avait pas déçu.

Si nous avions plus examiné la question, nous nous serions rendu compte que la gravité aurait, selon toute vraisemblance, ramené les minuscules fragments au-delà de l'horizon. Quelques fragments éjectés auraient pu entrer en collision avec des fragments en train de tomber. La région située juste au-dessus de l'horizon aurait été un fouillis de débris se cognant qui auraient été réchauffés par ces collisions répétées. Nous aurions même pu nous rendre compte que la zone située juste au-dessus de l'horizon aurait

été une masse bouillonnante de particules formant une atmosphère chaude. Enfin, nous aurions pu nous rendre compte que cette masse réchauffée se serait comportée comme n'importe quel objet réchauffé et aurait rayonné son énergie sous forme de chaleur. Mais nous ne l'avons pas fait. Feynman est retourné à ses partons et moi à ce qui confine les quarks à l'intérieur des protons.

Il est temps maintenant de vous dire précisément ce qu'*information* signifie. Information, entropie et énergie : trois concepts inséparables qui font l'objet du prochain chapitre.

Énergie et entropie

Énergie

L'énergie n'est que métamorphoses. À l'instar des êtres mythiques qui pouvaient se transformer d'humains en animaux, en plantes, en rochers, l'énergie peut aussi changer de forme. Cinétique, potentielle, chimique, électrique, nucléaire, thermique (la chaleur) sont quelques-uns des nombreux aspects sous lesquels l'énergie peut se présenter. Elle passe sans cesse de l'un à l'autre. Mais il y a une constante : l'énergie est conservée. Sa quantité totale, sous toutes ses formes, ne change jamais.

Voici quelques exemples de métamorphoses.

- Sisyphe manque d'énergie. Aussi, avant de pousser son rocher au sommet de la montagne pour la je-ne-sais-combientième fois, il s'arrête pour se requinquer avec un repas de miel. Quand le rocher atteint le sommet, le damné l'observe pendant que la gravité le fait rouler au bas de la montagne pour la je-ne-sais-combientième fois plus une. Le pauvre Sisyphe est condamné à convertir éternellement énergie chimique (le miel) en énergie potentielle puis cinétique. Pas si vite ! Que devient l'énergie cinétique du rocher quand il roule jusqu'à s'immobiliser en bas de la montagne ? Elle est transformée en chaleur. Un peu de cette chaleur se répand dans l'atmosphère et dans le sol. Sisyphe lui-même est réchauffé par cet effort. Le cycle de transformation de l'énergie de Sisyphe est le suivant :

chimique → potentielle → cinétique → thermique

- L'eau tombe des chutes du Niagara et prend de la vitesse. L'eau qui s'écoule, chargée d'énergie cinétique, est conduite à l'entrée d'une

turbine dont elle fait tourner le rotor. De l'électricité est produite qui circule à travers les câbles dans le réseau. Pouvez-vous schématiser les métamorphoses de l'énergie ? Les voici :

potentielle → cinétique → électrique

De plus, une partie de l'énergie est inutilement transformée en chaleur : l'eau qui sort de la turbine est plus chaude que celle qui y est entrée.

- Einstein a expliqué que la masse est énergie. Ce que voulait dire Einstein en affirmant que $E = mc^2$ était que tout objet possède une énergie latente qui peut être libérée en transformant, d'une façon ou d'une autre, sa masse. Par exemple, un noyau d'uranium finira par se diviser en un noyau de thorium et un noyau d'hélium. Les masses ajoutées du thorium et de l'hélium seront légèrement inférieures à celle de l'uranium d'origine. Cette petite masse excédentaire s'est transformée en énergie cinétique des noyaux de thorium et d'hélium ainsi qu'en quelques photons. Une fois que les atomes sont retournés au repos et que les électrons ont été absorbés, l'énergie en excès se transforme en chaleur.

De toutes les formes usuelles d'énergie, la chaleur est la plus mystérieuse. De quoi est-elle faite ? S'agit-il d'une substance comme l'eau ou est-ce quelque chose de plus fugitif ? Avant la théorie moderne moléculaire de la chaleur, les anciens physiciens et chimistes pensaient qu'elle était une substance qui se comportait comme un fluide. Ils l'avaient appelée *phlogistique* et pensaient qu'elle s'écoulait des objets chauds vers les objets froids, rafraîchissant les chauds et réchauffant les froids. Nous continuons d'ailleurs à parler de l'écoulement de la chaleur.

Mais la chaleur n'est pas une nouvelle substance : c'est une forme d'énergie. Rapetissez jusqu'à avoir la taille d'une molécule et regardez tout autour l'eau chaude dans une baignoire. Vous pourrez voir les molécules se déplacer au hasard et s'entrechoquer dans une danse effrénée, chaotique. Laissez l'eau refroidir et regardez à nouveau : les molécules se déplacent plus lentement. Refroidissez l'eau jusqu'à ce qu'elle gèle : les molécules sont coincées dans un cristal solide de glace. Mais, même dans la glace, les molécules continuent à vibrer. Elles cessent de bouger (en ignorant le mouvement quantique au point zéro) seulement quand toute l'énergie a été enlevée. À ce point, quand l'eau est à la température de $-273,15$ degrés Celsius – le zéro absolu –, on ne peut plus l'abaisser. Chaque molécule est fixée rigidement à sa place dans un

réseau cristallin parfait : tout mouvement confus et chaotique a cessé.

La conservation de l'énergie, quand elle se transforme de chaleur en d'autres formes, est parfois appelée *première loi de la thermodynamique*.

Entropie

Ce ne serait pas une bonne idée de laisser votre BMW garée dans une forêt tropicale pendant cinq siècles. À votre retour, vous ne trouveriez qu'un tas de rouille. Voilà ce qu'est l'augmentation de l'entropie. Si vous abandonnez la pile de rouille pendant cinq nouveaux siècles, vous pouvez être à peu près certains qu'elle ne va pas redevenir une BMW en état de marche. Voilà, en résumé, ce que dit la deuxième loi de la thermodynamique : l'entropie augmente. Tout le monde parle d'entropie : les poètes, les philosophes, les allumés de l'informatique. Mais qu'est-ce précisément ? Pour répondre à cette question, regardez de plus près la différence entre la BMW et l'amas de rouille. Dans les deux cas, nous avons un ensemble d'environ 10^{28} atomes, essentiellement de fer (et, dans le cas de la rouille, aussi d'oxygène). Imaginez que vous preniez ces atomes et les lanciez au hasard. Quelle est la probabilité pour qu'ils se regroupent pour former une automobile en état de marche ? Cela représenterait un gros travail pour simplement estimer à quel point ce serait improbable mais je pense que nous serons tous d'accord pour dire que ce serait extrêmement improbable. Évidemment, il serait bien plus probable d'obtenir un tas de rouille qu'une automobile flambant neuf. Ou même une vieille toute rouillée. Si vous séparez les atomes et les relanciez ensemble encore et encore, vous pourriez à la fin obtenir une voiture, mais vous auriez obtenu dans le même temps bien plus de tas de rouille. Pourquoi donc ? Qu'est-ce qu'une voiture a de si particulier – ou un tas de rouille ?

Si vous vous représentez toutes les façons possibles d'assembler les atomes, l'écrasante majorité des arrangements ressembleraient à des amas de rouille. Une partie bien plus petite ressemblerait à une voiture. Mais, même dans ce cas, si vous regardez sous le capot, le plus probable est que vous trouviez un paquet de rouille. Une partie encore plus minuscule des arrangements formeraient une automobile en état de marche. L'entropie d'une voiture

Pourquoi nous donnons-nous le mal de réduire l'information à des points et des traits, ou des zéros et des uns ? Pourquoi ne pas utiliser des séquences de 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 ou, mieux encore, les lettres de l'alphabet ? Les messages seraient plus simples à lire et prendraient bien moins de place.

La raison en est que l'alphabet (ou les dix chiffres ordinaires) est une construction humaine que nous apprenons à reconnaître et stockons dans notre mémoire. Mais chaque lettre, ou chiffre, contient déjà un bon paquet d'information : par exemple dans la différence complexe entre les lettres A et B ou les chiffres 5 et 8. Les télégraphistes et les informaticiens, qui ne comptent que sur les règles mathématiques les plus simples, préfèrent utiliser le *code binaire* des points et des traits, ou des zéros et des uns – en fait, ils y sont pratiquement obligés. De fait, quand Carl Sagan conçut un système pour envoyer des messages à des civilisations non humaines habitant d'autres systèmes solaires, il a utilisé le code binaire¹.

Revenons au roi Canut. Combien y a-t-il de messages de 77 bits qui forment des phrases *cohérentes* ? Je n'en ai vraiment aucune idée – peut-être quelques milliards. Mais ce nombre, quel qu'il soit, est une fraction infinitésimale de 2^{77} . Il est donc pratiquement certain qu'en prenant les 77 bits – ou les 32 lettres de « Le roi Canut a des verrues sur le menton » – et en les mélangeant, on obtiendra du charabia. En laissant de côté les espaces, voici ce que j'ai obtenu en le faisant avec des jetons de scrabble :

R E A U O E N N A S D C T E M E C O R I V T R N E U E L S L R S

Si vous ne mélangez que quelques lettres à chaque fois, la phrase perdra progressivement sa cohérence. « Le roi Canuta des verrues sur le menton » est toujours reconnaissable. Il en est de même pour « Le rio Canuta des verrue sur e mentlons ». Mais, peu à peu, les lettres finiront par former un méli-mélo dénué de sens. Il

1. L'astrophysicien américain Carl Sagan (1934-1996) était devenu très populaire après sa série télévisée de vulgarisation scientifique, *Cosmos*. Il a été à l'origine du programme SETI de recherche d'intelligence extraterrestre. À l'occasion du lancement, en 1972, des sondes spatiales Pioneer 10 et 11, destinées à quitter notre système solaire après l'avoir exploré, la conception d'une plaque portant un message pictural adressé à d'éventuels extraterrestres avait été confiée à Carl Sagan qui l'a réalisée avec son épouse et Franck Drake. (*N.d.T.*)

y a tellement plus de combinaisons dénuées de sens que la tendance en direction du charabia est inéluctable.

Je peux maintenant vous donner une définition de l'entropie.

L'entropie est une mesure du nombre d'arrangements qui se conforment à un critère spécifique reconnaissable. Si ce dernier est qu'il y a 77 bits, alors le nombre d'arrangements est 2^{77} .

Mais l'entropie *n'est pas* le nombre d'arrangements, dans notre cas 2^{77} . C'est simplement 77 – le nombre de fois qu'il faut multiplier 2 par lui-même pour obtenir le nombre d'arrangements. Le terme mathématique utilisé pour représenter le nombre de fois qu'il faut multiplier 2 par lui-même pour obtenir un nombre donné est appelé son *logarithme*¹. Ainsi, 77 est le logarithme de 2^{77} . Par suite, l'entropie est le logarithme du nombre d'arrangements.

Parmi les 2^{77} possibilités, seule une toute petite partie est constituée de phrases sensées. Disons un milliard. Pour arriver à un milliard, il faut multiplier 2 par lui-même environ 30 fois. Autrement dit, 2^{30} font environ un milliard ou, de façon équivalente, 30 est le logarithme d'un milliard. Il s'ensuit que l'entropie des phrases sensées n'est que d'à peu près 30, plutôt moins que 77. Les mélismes de symboles sans signification ont clairement davantage d'entropie que les combinaisons d'où ressortent des phrases cohérentes : il n'est guère surprenant que l'entropie augmente quand on mélange les lettres.

Supposons que l'entreprise BMW ait amélioré ses contrôles de qualité à un point tel que toutes les voitures qui sortent de la chaîne de montage soient identiques. En d'autres termes, supposons qu'il y ait un, et un seul, arrangement des atomes reconnu comme étant une véritable BMW. Quelle serait son entropie ? La réponse est zéro. Il n'y aurait aucune incertitude sur quelque détail que ce soit

1. En toute rigueur, il s'agit du *logarithme de base 2*. Il y a d'autres façons de définir des logarithmes. Par exemple, au lieu du nombre de 2, on peut chercher le nombre de 10 qu'il faut multiplier par lui-même pour obtenir un nombre donné. Cela définirait le *logarithme de base 10*, on dit le *logarithme décimal*. Inutile de dire qu'il faut moins de 10 que de 2 pour obtenir un nombre donné.

La définition officielle de l'entropie en physique est le nombre de fois qu'il faut multiplier par lui-même le nombre noté en mathématique *e*. Ce nombre « exponentiel » vaut approximativement 2,718 281 83. En d'autres termes, l'entropie est le *logarithme naturel* ou *népérien*, ou encore *logarithme de base e*, tandis que le nombre de bits (77 dans notre exemple) est le *logarithme de base 2*. Le logarithme népérien est un petit peu plus petit que le nombre de bits, d'un facteur 0,7 environ. Ainsi, pour les puristes, l'entropie d'un message de 77 bits est $0,7 \times 77$, ce qui donne environ 54. Dans ce livre, je ne ferai pas la différence entre bits et entropie.

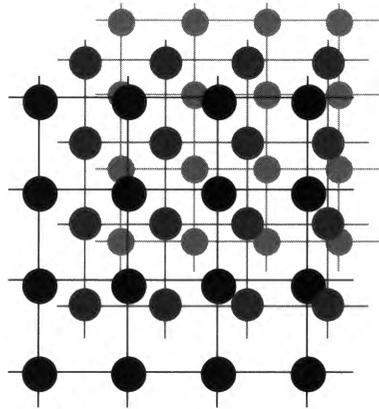
quand une BMW sort de la chaîne de montage. Du moment qu'on fixe un arrangement unique, il n'y a pas d'entropie du tout.

La deuxième loi de la thermodynamique, qui affirme que l'entropie augmente, est une simple façon de dire que plus le temps passe, plus on a tendance à perdre la trace des détails. Imaginons que nous jetions une gouttelette d'encre noire dans un bac rempli d'eau chaude. Au début, nous saurions précisément où se trouve l'encre : le nombre de configurations possibles de la répartition de l'encre n'est pas trop grand. Mais, à mesure que nous verrions l'encre diffuser dans l'eau, nous en saurions de moins en moins sur la position des molécules individuelles qui composent l'encre. Le nombre d'arrangements correspondant à ce que nous observerions – c'est-à-dire un bac rempli d'une eau d'un léger gris uniforme – est devenu énorme. Nous pourrions attendre tant et plus : nous ne verrions pas l'encre se reformer en une goutte concentrée. L'entropie augmente : c'est là la deuxième loi de la thermodynamique. Tout va vers une triste uniformité.

Un autre exemple : une baignoire pleine d'eau chaude. Que savons-nous de l'eau du bain ? Admettons qu'elle est dans la baignoire depuis suffisamment longtemps pour qu'on ne puisse détecter aucun mouvement. Nous pouvons mesurer la quantité d'eau dans la baignoire (200 litres) et sa température (30 degrés Celsius). Mais le bain est plein de molécules d'eau et il y a à l'évidence un très grand nombre d'arrangements de ces molécules correspondant aux conditions données – 200 litres d'eau à 30 degrés Celsius. Nous en saurions bien plus si nous pouvions faire des mesures précises sur chaque atome.

L'entropie est une mesure de la quantité d'information perdue en détail – des détails qui, pour une raison ou une autre, sont trop difficiles à observer. Ainsi, *l'entropie est de l'information cachée*. Dans la plupart des cas, elle l'est parce qu'elle concerne des choses trop petites pour qu'on les voie et trop nombreuses pour qu'on puisse en garder la trace. Dans le cas de l'eau du bain, il s'agit de détails microscopiques sur ses molécules – leur position et le mouvement de chacune d'elles parmi les milliards de milliards de milliards de molécules d'eau individuelles dans la baignoire.

Que devient l'entropie si l'on refroidit l'eau jusqu'au zéro absolu ? Si l'on enlève toute l'énergie contenue dans l'eau, les molécules se disposeront dans un arrangement unique, le réseau gelé qui compose un cristal parfait de glace.



Réseau cristallin

Les molécules sont trop petites pour être vues mais, malgré cela, si vous êtes familier des propriétés des cristaux, vous pourrez prédire la position de chaque molécule. Un cristal parfait, comme la BMW parfaite, n'a pas d'entropie du tout.

Combien de bits peut-on fourrer dans une bibliothèque ?

Dans l'usage d'une langue, équivoque et subtilité des nuances sont souvent très valorisées. De fait, si les mots avaient un sens parfaitement précis qui pouvait être intégré dans un programme informatique, le langage, tout comme la littérature, en seraient appauvris. Mais la précision en science exige un grand degré d'exactitude linguistique. Le mot *information* peut signifier bien des choses : « Je pense que votre information est fausse. » « Pour votre information, Mars a deux lunes. » « J'ai une maîtrise en sciences de l'information. » « Vous pouvez trouver cette information à la bibliothèque du Congrès. » Dans chacune de ces phrases, le mot *information* est utilisé dans un sens spécifique. Ce n'est que dans la dernière d'entre elles que poser la question « Où l'information est-elle située ? » signifie quelque chose.

Mais poursuivons sur cette idée de localisation. Si je vous dis que le général Grant est enterré dans la tombe de Grant, nous serons bien d'accord que je vous ai fourni une brîbe d'information. Mais où se trouve cette information ? Dans votre tête ? Dans la

mienne ? S'agit-il d'une chose en quelque sorte trop abstraite pour être localisée ? Est-elle diffuse dans l'univers, à la disposition de n'importe qui, n'importe où ?

Voici une réponse très concrète : l'information est sur cette page, conservée sous la forme physique de lettres faites de carbone et autres molécules. En ce sens, l'information est quelque chose de tangible – c'est presque une substance ; au point que l'information dans votre livre et celle du mien sont différentes. Dans votre livre, elle dit que le général Grant est enterré dans sa tombe. Vous présumez peut-être qu'elle dit la même chose dans le mien, mais vous n'en êtes pas certain. Il se peut que mon livre affirme que le général Grant est enterré dans la grande pyramide de Gizeh... En fait, aucun livre ne contient l'information : l'information que le général Grant est enterré dans sa tombe se trouve... dans la tombe de Grant !

Dans le sens où les physiciens utilisent le mot, l'information est faite de matière¹ et se trouve quelque part. L'information contenue dans ce livre est située dans un volume rectangulaire qui fait environ 15 centimètres de large, 25 centimètres de long et un peu moins de 3 centimètres d'épaisseur – c'est-à-dire environ 1 000 centimètres cubes². Combien y a-t-il de bits d'information cachés entre les couvertures de ce livre ? Une ligne imprimée contient en gros 70 caractères – lettres, signes de ponctuation et espaces. À raison de 40 lignes par page et de 430 pages, on est un peu au-dessus du million de caractères.

Le clavier de mon ordinateur a une centaine de symboles, y compris les minuscules, les majuscules et les signes de ponctuation. Cela signifie que le nombre de messages distincts qui pourraient être contenus dans ce livre est d'environ 100 multiplié par lui-même un million de fois, autrement dit 100 élevé à la puissance un million. Ce nombre, énorme, est du même ordre que 2 multiplié par lui-même 7 millions de fois. Le livre contient environ 7 millions de bits d'information. En d'autres termes, si j'avais écrit mon livre en morse, il aurait fallu 7 millions de points

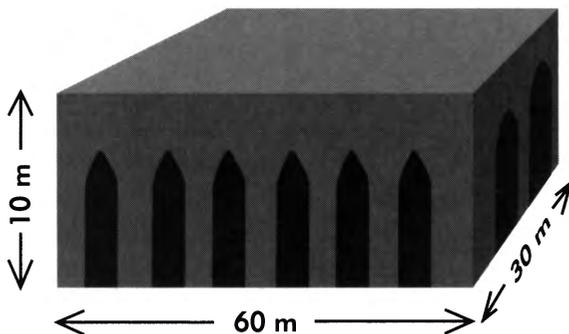
1. Quand des physiciens utilisent le mot *matière*, ils n'entendent pas seulement des objets faits d'atomes. Les autres particules élémentaires, comme les photons, les neutrinos et les gravitons, ont aussi droit à cette appellation.

2. Les dimensions ne sont qu'une estimation basée sur celles de mon précédent livre. Il est clair que les dimensions finales de celui-ci seront légèrement différentes.

et de traits. Divisé par le volume du livre, nous trouvons 7 000 bits par centimètre cube. Telle est la densité d'information contenue dans ce volume de pages imprimées.

J'ai lu une fois que la Grande Bibliothèque d'Alexandrie contenait mille milliards de bits avant d'avoir été réduite en cendres. Bien que ne faisant pas officiellement partie des Sept Merveilles du monde, cette bibliothèque était néanmoins une des plus grandes merveilles du monde antique. Elle fut construite sous le règne de Ptolémée II et elle est réputée avoir contenu une copie de chaque document important jamais écrit, sous la forme d'un demi-million de rouleaux de parchemin. Nul ne sait qui l'a incendiée mais nous pouvons être sûrs qu'énormément d'information, d'une valeur inestimable, est partie en fumée. Quelle quantité exactement ? Je dirais qu'il y avait une cinquantaine de nos pages dans un rouleau de parchemin. S'il s'agit de pages semblables à celle que vous êtes en train de lire, un rouleau représentait un million de bits, à quelques centaines de mille près. Dans ces conditions, la bibliothèque de Ptolémée aurait dû contenir cinq cents milliards de bits – pas très loin de ce que j'avais lu.

La perte de cette information a été un des grands malheurs dont les spécialistes de l'Antiquité doivent s'accommoder aujourd'hui. Mais cela aurait pu être pire. Que dire si tous les coins et recoins, si chaque centimètre cube disponible avait été rempli de livres comme celui-ci ? Je ne sais pas exactement quelle était la taille de la Grande Bibliothèque mais disons qu'elle faisait $60 \times 30 \times 10$ mètres, soit de l'ordre de 20 000 mètres cubes – la dimension d'un bâtiment public de bonne taille d'aujourd'hui. Cela donne 20 milliards de centimètres cubes.



Sachant cela, il est facile d'évaluer combien de bits d'information pourraient être stockés dans le bâtiment. À raison de 7 000 bits par centimètre cube, cela fait en tout $1,4 \times 10^{14}$ bits. Prodigeux !

Mais pourquoi s'arrêter aux livres ? Si chaque livre était réduit au dixième de son volume, dix fois plus de bits d'information pourraient y être entassés. Mettre le contenu en microfiches permettrait d'en emmagasiner encore davantage. Et numériser chaque livre plus encore.

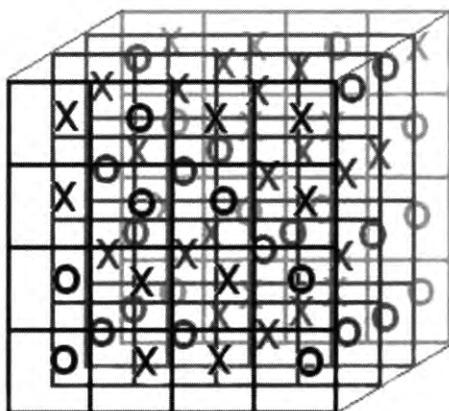
Y a-t-il quelque chose de primordial en physique qui imposerait un seuil à la quantité d'espace requise pour contenir un bit unique ? Les dimensions physiques d'un bit de données réel doivent-elles être plus grandes que celles d'un atome, d'un noyau, d'un quark ? Pouvons-nous diviser indéfiniment l'espace et le remplir sans cesse d'information ? Ou y a-t-il une limite – pas une limite pratique, technologique, mais la conséquence d'une loi profonde de la nature ?

Le bit d'information le plus petit

Plus petit qu'un atome, qu'un quark et même qu'un neutrino : le bit élémentaire pourrait bien être la brique la plus fondamentale. Sans aucune structure, le bit est simplement là – ou pas. John Wheeler croyait que tous les objets matériels sont faits de bits d'information. Idée qu'il a exprimée en une formule ramassée : « *It from bit* », et qu'on pourrait traduire par « la matière vient du bit » ou encore « tout n'est qu'information ».

John supposait qu'un bit, le plus élémentaire de tous les objets, a la plus petite taille possible – ce quantum fondamental de longueur découvert par Max Planck il y a plus d'un siècle. L'image approximative que tous les physiciens ont en tête est l'espace divisé en minuscules cellules à l'échelle de Planck, un peu comme un échiquier en trois dimensions. Un bit d'information peut être stocké dans chaque cellule. Le bit peut être représenté comme une particule très simple, chaque cellule pouvant en contenir une ou non. Une autre façon de voir est d'imaginer que ces cellules forment un énorme jeu de morpion en trois dimensions.

D'après la philosophie « *It from bit* » de Wheeler, les conditions matérielles du monde à un quelconque instant donné peuvent être représentées par un « message » de ce type. Si nous avons la



clé du code, nous saurions exactement ce qui se passe dans cette portion d'espace. Par exemple, s'agit-il de ce que nous appelons habituellement l'espace vide – un *vacuum* –, ou bien un morceau de fer, ou encore l'intérieur d'un noyau ?

Du fait que le monde se modifie à mesure que le temps passe – les planètes se déplacent, des particules se désintègrent, des gens naissent et meurent –, le message en O et en X doit aussi changer. À un instant, le motif pourrait ressembler au dessin ci-dessus ; un peu plus tard, il faudrait en réarranger la disposition.

Dans cet univers d'information de Wheeler, les lois de la physique consisteraient en règles sur la façon dont la configuration des bits doit être actualisée d'un instant à l'autre. De telles règles, pour peu qu'elles soient correctement construites, autoriseraient des ondes de O et de X à se propager à travers le treillis de cellules représentant ainsi les ondes lumineuses. Un grand morceau de O compact pourrait perturber la distribution de X et de O dans son voisinage : ainsi pourrait être représenté le champ gravitationnel d'une lourde masse.

Revenons-en à la question sur la quantité d'information qui pourrait être enfournée dans la bibliothèque d'Alexandrie. Tout ce que nous avons à faire est de diviser le volume de la bibliothèque – 20 milliards de centimètres cubes – en cellules à l'échelle de Planck : la réponse est de l'ordre de 10^{109} bits.

Cela fait beaucoup : de loin plus que ce que contiennent Internet tout entier, tous les livres du monde, les disques durs, les CD – en fait énormément plus. Pour avoir une idée de la quantité d'information représentée par 10^{109} bits, imaginons combien de

livres ordinaires il faudrait pour la contenir. La réponse est bien plus que ce qu'il serait possible de faire tenir en remplissant tout l'univers observable...

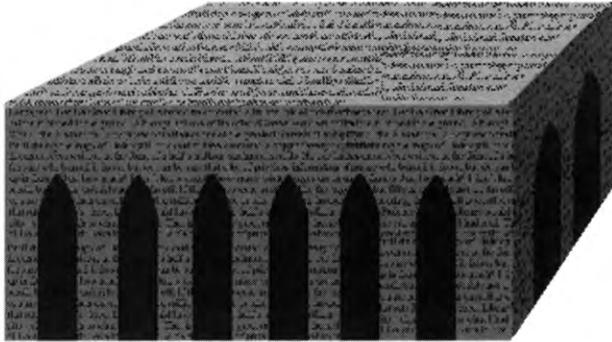
La philosophie « It from bit » qui décrit un monde « cellulaire » rempli de bits d'information à l'échelle de Planck est très séduisante. Elle a influencé les physiciens sur de nombreux plans. Richard Feynman était un de ses grands défenseurs. Il a passé pas mal de temps à construire des univers simplifiés faits de bits remplissant l'espace. Mais elle est fautive. Comme nous le verrons, Ptolémée aurait été déçu d'apprendre que sa Grande Bibliothèque n'aurait jamais pu contenir davantage qu'un tout petit 10^{74} bits¹.

Je peux plus ou moins me représenter ce que signifie un million : un cube d'un mètre de côté contient un million de boules de gomme. Mais un milliard ? Mille milliards ? Il est difficile de faire la différence entre les deux, même si nous savons que le second est mille fois plus grand que le premier. Quant à 10^{74} ou 10^{109} , ce sont là des nombres bien trop grands pour être appréhendés ; tout ce qu'on peut dire est que 10^{109} est beaucoup plus grand que 10^{74} . En fait, 10^{74} – le véritable nombre de bits d'information qui pourraient tenir dans la bibliothèque d'Alexandrie – est une fraction infime du 10^{109} que nous avons calculé. Pourquoi une différence aussi énorme ? Réponse au prochain chapitre... Mais je vais vous donner un indice tout de suite.

Peur et paranoïa chez les rois et les princes sont une source de sujets d'histoire par trop communs. Ptolémée en souffrait-il ? Je n'en ai aucune idée mais imaginons comment il aurait pu réagir à une rumeur disant que des informations secrètes étaient cachées par ses ennemis dans sa bibliothèque. Il aurait pu se croire autorisé à promulguer une loi draconienne interdisant toute information cachée. Concernant la bibliothèque d'Alexandrie, la loi imaginaire de Ptolémée aurait pu exiger que chaque bit d'information soit visible de l'extérieur du bâtiment. Pour se conformer à la loi, il aurait fallu que toute l'information fût écrite sur les murs extérieurs de la bibliothèque. Le bibliothécaire se serait vu interdire de cacher un simple bit à l'intérieur. Des hiéroglyphes sur les murs extérieurs ? Autorisé. Des écritures en caractères romains, grecs, arabes sur les murs ? Autorisé. Mais des rouleaux emportés à l'intérieur : interdit. Quel gaspillage de place ! Mais telle était la loi. Dans ces

1. Comme par hasard, c'est à peu près le nombre de bits que pourrait contenir un univers entièrement rempli de livres imprimés.

circonstances, quel était le nombre maximal de bits que Ptolémée pouvait s'attendre à conserver dans sa bibliothèque ?



Pour trouver la réponse, Ptolémée aurait demandé à ses serviteurs de mesurer soigneusement les dimensions extérieures du bâtiment et de calculer l'aire des murs extérieurs et du toit (laissons de côté les arches et le sol). Ce qui donne : $(60 \times 10) + (60 \times 10) + (30 \times 10) + (30 \times 10) + (60 \times 30)$, ce qui est égal à 3 600 mètres carrés. Remarquez que, cette fois, l'unité est le mètre *carré* et non plus le mètre *cube*.

Mais le roi voulait que l'aire soit mesurée en unités de Planck plutôt qu'en mètres carrés. Je vais le faire pour vous. Le nombre de bits avec lesquels il aurait pu recouvrir les murs et le toit est d'environ 10^{74} .

Une des découvertes les plus surprenantes, et les plus bizarres, de la physique moderne est qu'il n'y a nul besoin de la loi de Ptolémée dans le monde réel. La nature a déjà fourni une telle loi que même les rois ne peuvent abroger. C'est une des lois les plus profondes de la nature qui ait été découverte : *la quantité maximale d'information qui peut être emmagasinée dans une région de l'espace est égale à l'aire de cette dernière et non à son volume*. C'est cette étrange restriction dans le remplissage de l'espace avec l'information qui forme le sujet du chapitre 18.

Entropie et chaleur

La chaleur est l'énergie du mouvement chaotique aléatoire, l'entropie la quantité d'information microscopique cachée. Considé-

rons l'eau du bain, maintenant refroidie à la plus basse température possible, le zéro absolu, où chaque molécule est bloquée à une place précise à l'intérieur du cristal de glace. Il y a très peu d'imprécision sur la position de chaque molécule. En fait, quiconque connaît la théorie des cristaux de glace pourrait dire précisément où se trouve chaque atome, même sans microscope. Il n'y a pas d'information cachée. Énergie, température et entropie ont une valeur nulle.

Ajoutons maintenant un peu de chaleur en réchauffant la glace. Les molécules commencent à s'agiter, mais un peu seulement. Une petite quantité d'information est perdue : nous avons perdu la trace, même si ce n'est qu'un petit peu, de détails ; le nombre de configurations que nous pourrions confondre entre elles par erreur est plus grand qu'il ne l'était. Ainsi, un peu de chaleur fait s'accroître l'entropie et cela s'aggrave quand on augmente encore l'énergie. Le cristal approche du point de fusion et les molécules commencent tout juste à glisser les unes sur les autres. Conserver la trace de tous les détails devient vite inaccessible. Autrement dit, énergie et entropie augmentent en même temps.

Énergie et entropie sont des choses différentes. L'énergie prend de nombreuses formes mais l'une d'entre elles, la chaleur, est jumelle siamoise de l'entropie.

Où l'on reparle de la deuxième loi de la thermodynamique

La première loi de la thermodynamique concerne la conservation de l'énergie : on ne peut créer de l'énergie, pas plus qu'en détruire ; tout ce qu'on peut faire est en changer la forme. La deuxième loi est encore plus décourageante : l'ignorance augmente toujours.

Imaginez la scène où un plongeur saute d'un tremplin dans une piscine :

énergie potentielle → énergie cinétique → chaleur

Il s'arrête rapidement et l'énergie potentielle de départ s'est transformée, provoquant une légère augmentation de l'énergie thermique (la chaleur) de l'eau. En même temps, il y a un accroissement parallèle de l'entropie.

Le plongeur voudrait renouveler l'expérience mais il est paresseux et ne veut pas remonter sur le tremplin par l'échelle. Il sait

que l'énergie ne disparaît jamais : pourquoi ne pas attendre qu'une partie de la chaleur du bassin retourne à l'état d'énergie potentielle, *son* énergie potentielle ? La conservation de l'énergie n'interdit aucunement qu'un léger refroidissement du bassin l'expédie sur le tremplin : ce serait le film inversé du plongeur. Non seulement il finirait dessus mais l'entropie du bassin diminuerait, entraînant une surprenante baisse de l'ignorance.

Malheureusement, notre ami n'a suivi que la moitié de son cours de thermodynamique, la première moitié. Il aurait appris dans la seconde ce que nous, nous savons : l'entropie augmente *toujours*. L'énergie se dégrade *toujours*. Énergie potentielle, cinétique, chimique, etc. d'une part, chaleur de l'autre : le passage de l'énergie d'une forme à une autre se fait toujours dans le sens de plus de chaleur et moins de ces formes d'énergie organisées, non chaotiques. Telle est la deuxième loi de la thermodynamique : l'entropie totale de l'univers augmente toujours.

C'est la raison pour laquelle une voiture s'arrêtera toujours dans un crissement de pneus quand on appuie sur le frein, alors qu'appuyer sur le frein d'une voiture à l'arrêt ne la mettra pas en mouvement. La chaleur incohérente du sol et de l'air ne peut pas être transformée en cette forme d'énergie plus organisée qu'est l'énergie cinétique d'un véhicule en mouvement. C'est aussi la raison pour laquelle la chaleur de la mer ne peut être captée pour résoudre les problèmes d'énergie de la société. Globalement, les formes organisées de l'énergie se dégradent en chaleur, pas le contraire.

Chaleur, entropie, information : qu'est-ce que ces concepts concrets, utilitaires ont à voir avec les trous noirs et les fondements de la physique ? Tout... Nous verrons au prochain chapitre que les trous noirs sont fondamentalement des conteneurs d'information cachée. En fait, ils sont les réservoirs à information remplis de la façon la plus dense qui soit dans la nature. Cela pourrait bien être la meilleure définition d'un trou noir. Mais regardons comment Jacob Bekenstein et Stephen Hawking en sont venus à se rendre compte de ce fait capital.

La bande de Wheeler, ou quelle quantité d'information peut-on fourrer dans un trou noir ?

En 1972, pendant que je discutais avec Richard Feynman au West End Café, un jeune diplômé de Princeton, Jacob Bekenstein, se demandait ce que la chaleur, l'entropie et l'information ont à voir avec les trous noirs. À cette époque, Princeton était le centre du monde pour tout ce qui touche à la physique de la gravitation. Il y a peut-être un rapport avec le fait qu'Einstein avait vécu là pendant plus de vingt ans bien que, en 1972, il fût mort depuis dix-sept ans. Le professeur de Princeton qui a suscité chez nombre de jeunes et brillants physiciens l'envie d'étudier la gravité et de méditer sur les trous noirs était John Archibald Wheeler – un des grands visionnaires de la physique moderne. Parmi les nombreux physiciens célèbres qui furent profondément influencés par lui à cette époque : Charles Misner, Kip Thorne, Claudio Teitelboim et Jacob Bekenstein. Wheeler, qui avait été auparavant le patron de thèse de Feynman, était un disciple d'Einstein. Tout comme le grand homme, il était convaincu que la clef des lois de l'univers se trouvait dans la théorie de la gravitation. Mais Wheeler – qui avait travaillé avec Niels Bohr – était, contrairement à Einstein, aussi partisan de la mécanique quantique. C'est ainsi que Princeton était un centre de recherches non seulement sur la gravitation mais aussi sur la gravité quantique.

La théorie de la gravité était alors une morne plaine de la physique théorique où peu avaient le goût de s'aventurer. Les physiciens s'occupant de particules élémentaires progressaient à pas de géants dans la démarche réductionniste vers des structures toujours plus minuscules. Les atomes avaient depuis longtemps conduit aux noyaux et ceux-ci aux quarks. Les neutrinos trouvaient leur juste

place, à l'égal des électrons, et l'on avait déjà postulé l'existence de particules nouvelles comme les quarks charmés, qui en étaient à un an ou deux de leur découverte expérimentale. La radioactivité des noyaux avait en fin de compte été maîtrisée et la mise au point du modèle standard des particules élémentaires était sur le point d'être achevée. Les physiciens qui s'occupaient de particules élémentaires, moi compris, pensaient qu'ils avaient mieux à faire que perdre leur temps avec la gravité. Il y avait des exceptions, comme Steven Weinberg, mais la plupart considéraient le sujet comme futile.

Rétrospectivement, on peut dire que ce dédain pour la gravitation était à très courte vue. Comment se faisait-il que les énergiques leaders de la physique, ces pionniers intrépides, fussent aussi peu curieux de ce qui touchait à la gravitation ? La raison en est qu'ils ne voyaient absolument pas en quoi cette dernière aurait pu influencer de manière significative sur la façon dont les particules interagissent. Imaginez que nous disposions d'un interrupteur nous permettant d'annuler la force électrique à l'intérieur d'un atome entre noyau et électrons, abandonnant de ce fait à la gravitation le maintien en orbite des électrons. Qu'arriverait-il à l'atome si nous commuons l'interrupteur ? Il se dilaterait immédiatement parce que les forces qui le confinaient auraient diminué d'intensité. Pour parvenir à quelle taille ? Il deviendrait bien plus grand que l'univers observable !

Et que se passerait-il si nous laissons en place les forces électriques mais interrompions la gravité ? La Terre s'échapperait loin du Soleil mais, au niveau de l'atome, les changements seraient bien trop petits pour qu'on perçoive une quelconque différence. Quantitativement, la force gravitationnelle entre deux électrons d'un atome est en gros un million de milliards de milliards de milliards de milliards de fois plus faible que les forces électriques.

Tel était l'environnement intellectuel quand John Wheeler entreprit avec audace l'exploration de l'océan d'ignorance qui séparait le monde conformiste des particules élémentaires de la théorie de la gravitation d'Einstein. Wheeler lui-même était une énigme ambulante. À le voir et à l'entendre, il apparaissait comme un homme d'affaires très comme il faut. Il aurait facilement pu s'intégrer aux conseils d'administration des entreprises américaines les plus conservatrices. De fait, il avait des idées très conservatrices. La guerre froide avait beau être terminée depuis longtemps,

John demeurait un anticommuniste convaincu. Malgré cela, au cours des années 1960 et 1970, alors que les campus universitaires étaient le théâtre d'un activisme sans précédent, il était profondément aimé de ses étudiants. Claudio Teitelboim, qui est aujourd'hui le physicien latino-américain le plus éminent, était un des étudiants de John¹. Claudio, le rejeton d'une célèbre famille chilienne de gauche, était l'un des nombreux disciples de John qui devinrent plus tard célèbres. Sa famille était politiquement liée à Salvador Allende ; Claudio lui-même était un intrépide adversaire déclaré du régime dictatorial de Pinochet. Mais, en dépit de leurs différences politiques, John et Claudio ont été liés par une amitié extraordinaire basée sur l'estime et le respect mutuel des opinions de l'autre.

J'ai rencontré Wheeler pour la première fois en 1961. J'étais en licence au City College de New York avec, dirons-nous, un dossier universitaire peu orthodoxe. Un de mes professeurs, Harry Soodack – un type qui mâchonnait son cigare en jurant, originaire des mêmes milieux ouvriers juifs de gauche que moi –, m'a fait descendre à Princeton pour le rencontrer. L'idée était que Wheeler allait être impressionné et que je pourrais être admis en maîtrise bien que n'ayant pas encore ma licence en poche. À ce moment-là, je travaillais comme plombier dans le South Bronx et ma mère pensait que je devrais être habillé convenablement pour cette rencontre. Dans l'esprit de ma mère, cela voulait dire que je devrais montrer ma solidarité avec ma classe sociale et mettre mes habits de travail. De nos jours, mon plombier de Palo Alto s'habille à peu près de la même manière que je le fais quand je donne une conférence à l'université de Stanford. Mais, en 1961, ma tenue de plombier était la même que celle de mon père et que celle de tous ses copains plombiers du South Bronx – salopette à la Li'l Abner²,

1. La vie de Claudio a été pleine d'événements dramatiques. Un des épisodes les plus sensationnels se produisit en 2005, quand il découvrit que son père était Álvaro Bunster, le patriarche d'une héroïque famille antifasciste. Comme un célèbre journal chilien l'a écrit sur sa manchette : « L'illustre physicien chilien à la recherche des origines de l'univers découvre les siennes ». Depuis, Claudio a changé son nom de famille en Bunster.

2. *Lil'Abner* était une courte bande dessinée de quelques cartouches (un « comic strip », comme *Kelvin et Hobbs*, ou *Peanuts*, plus connus en France) qui a été publiée dans de nombreux quotidiens américains de 1934 à 1977 et était donc très connue du grand public. Elle mettait en scène un clan fictif de « hillbillies » dans le décor tout aussi fictif du village pauvre de Dogpatch (« Coinachiens »), dans le Kentucky. (*N.d.T.*)

chemise de travail en flanelle bleue et grosses chaussures de chantier. J'arborais aussi une cagoule pour protéger mes cheveux de la poussière et de la crasse.

Quand Harry m'a récupéré pour me conduire à Princeton, il est resté pantois : son cigare lui est tombé de la bouche... et il m'a envoyé me rhabiller. Il m'a expliqué que ce n'était pas le genre de Wheeler.

Dès l'instant où je me suis avancé dans le bureau du grand professeur, j'ai compris ce que Harry avait voulu dire. La seule façon pour moi de décrire l'homme qui m'a accueilli est qu'il avait l'air d'un républicain. Que diable étais-je venu faire dans le nid de Wasps¹ qu'était cette université ?

Deux heures plus tard, j'étais complètement séduit. John m'avait décrit avec enthousiasme comment il imaginait que l'espace et le temps seraient un monde sauvage, agité, écumant de fluctuations quantiques si l'on pouvait les voir à travers un microscope démentiellement puissant. Il m'expliqua que le problème le plus profond et le plus excitant de la physique était d'unifier les deux grandes théories d'Einstein – la relativité générale et la mécanique quantique. Il disait que c'est seulement à l'échelle de Planck que les particules élémentaires révéleraient leur nature véritable qui ne serait que géométrie – une géométrie quantique. Pour le jeune aspirant physicien que j'étais, l'homme d'affaires à l'apparence guindée s'était métamorphosé en visionnaire idéaliste. Ce que je désirais par-dessus tout était me jeter dans la bataille derrière cet homme.

John Wheeler était-il vraiment aussi conservateur qu'il en avait l'air ? Je n'en sais vraiment rien. En tout cas, il n'était sûrement pas un moralisateur pudibond. Une fois que nous étions, avec ma femme et John, en train de boire un verre sur la plage, dans un café de Valparaiso, il s'est levé pour marcher un peu, nous expliquant qu'il voulait reluquer les filles sud-américaines en bikini. Il allait alors sur ses quatre-vingt-dix ans.

Quoi qu'il en soit, je n'ai jamais rejoint la bande de Wheeler : Princeton ne m'a pas accepté. Je suis parti à Cornell, où la physique était bien plus insipide. Mais bien des années ont passé avant que je ne ressente le même frisson qu'en 1961.

1. Wasp, guêpe, mais aussi abréviation de White Anglo-Saxon Protestant, désignant un membre des classes aisées et influentes américaines – d'où le jeu de mot sur nid de guêpes/repaire de Wasps. Le Parti républicain est, aux États-Unis, le parti conservateur. (*N.d.T.*)

Vers 1970, Wheeler s'est énormément intéressé aux objets s'effondrant sous l'effet de la gravité que Karl Schwarzschild avait décrits en 1917. À l'époque, on les appelait étoiles noires, ou étoiles sombres. Mais cela ne traduisait pas la nature de ces objets – le fait qu'ils sont des trous profonds de l'espace dont l'attraction gravitationnelle est irrésistible. Wheeler a commencé à les nommer trous noirs. Au départ, cette dénomination fut blackboulée par la prestigieuse revue américaine de physique, la *Physical Review*. Aujourd'hui, les raisons en paraissent grotesques : l'expression *trou noir* était considérée comme *obscène* ! Mais John a bataillé au comité éditorial et trous noirs ils se nomment désormais¹.

De façon amusante, la création suivante de John fut le dicton : « Les trous noirs n'ont pas de poils. » Je ne sais pas si la *Physical Review* s'est sentie une fois de plus outragée, mais la terminologie s'est incrustée. Wheeler ne cherchait pas à provoquer les éditeurs de la revue. Bien au contraire, il réalisait une très sérieuse avancée sur les propriétés de l'horizon des trous noirs. Ce qu'il entendait par « poils » était les caractéristiques observables comme les bosses et autres irrégularités. Wheeler mettait en lumière le fait que l'horizon d'un trou noir était sans trait distinctif, aussi lisse que le plus lisse des crânes chauves – en réalité bien plus lisse. Quand un trou noir se forme, par exemple par effondrement d'une étoile, l'horizon se fixe très vite en une sphère parfaitement régulière, sans aucune aspérité. En dehors de la masse et de la vitesse de rotation, deux trous noirs sont parfaitement identiques. C'est du moins ce qu'on croyait.

Jacob Bekenstein est israélien. C'est un homme petit et calme. Son apparence est celle d'un homme doux et cultivé mais elle dissimule son audace intellectuelle. En 1972, il était un des étudiants de troisième cycle de Wheeler qui se préoccupaient des trous noirs. Ce n'est pas tant les objets astrophysiques qu'on pourrait un jour finir par voir au télescope qui l'intéressaient. Bekenstein était passionné par les fondements de la physique, ses principes de base sous-jacents, et il sentait que les trous noirs pourraient révéler quelque chose de profond sur les lois de la nature. Il était particulièrement intrigué par la façon dont les principes de la mécanique quantique et de la thermodynamique pourraient s'adapter aux trous

1. J'ai entendu cette histoire pour la première fois de la bouche du grand spécialiste de la relativité générale Werner Israel.

noirs, chose qui avait tellement préoccupé Einstein. De fait, la façon de faire de la physique de Bekenstein ressemblait beaucoup à celle d'Einstein : tous deux étaient maîtres en expériences de pensée. En faisant intervenir très peu de mathématiques mais avec une réflexion intense et profonde sur les principes de la physique et la façon dont ils s'appliquent à des circonstances imaginées (mais possibles), les deux hommes étaient capables d'arriver à des conclusions qui menaient très loin et pouvaient considérablement influencer sur l'avenir de la physique.

Voici en quelques mots la question de Bekenstein. Imaginez que vous soyez en orbite autour d'un trou noir. Vous avez en votre possession une bouteille de gaz chaud – du gaz avec un bon paquet d'entropie. Vous lancez votre bouteille d'entropie à l'intérieur du trou noir. De ce que nous savons, la bouteille devrait simplement se volatiliser derrière l'horizon. Comme on peut s'y attendre, cette entropie disparaîtrait complètement de l'univers observable. D'après ce que nous avons vu, l'horizon lisse et chauve ne pourrait en aucun cas dissimuler une information quelconque. Il semblerait donc que l'entropie de l'univers ait diminué, en contradiction avec la deuxième loi de la thermodynamique qui dit que l'entropie ne diminue jamais. Serait-il possible de violer si facilement un principe aussi profond que la deuxième loi ? Einstein en aurait été horrifié !

Pour Bekenstein, la deuxième loi était trop profondément ancrée dans les fondements de la physique pour être violée aussi aisément. Il fit donc une proposition radicalement nouvelle : les trous noirs doivent eux-mêmes avoir de l'entropie. Il soutenait que, si l'on ajoute toute l'entropie de l'univers – l'information manquante dans les étoiles, le gaz interstellaire, l'atmosphère des planètes, l'eau chaude de toutes les baignoires –, on doit inclure une certaine quantité d'entropie pour chaque trou noir. En outre, plus gros est le trou noir, plus grande est son entropie. De cette manière, Bekenstein pouvait sauver la deuxième loi. Nul doute qu'Einstein aurait approuvé.

Voici comment Bekenstein s'y prit. L'entropie va toujours de pair avec l'énergie. Elle a un rapport avec le nombre d'arrangements de quelque chose, et ce quelque chose, dans tous les cas, possède de l'énergie. Même l'encre de cette page est faite d'atomes ayant une masse et donc, d'après Einstein, de l'énergie puisque la masse est une forme d'énergie. On peut dire que l'entropie

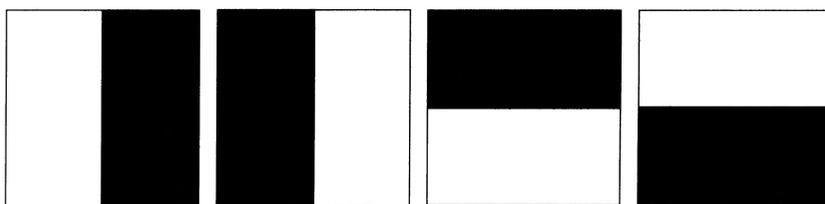
décompte les différentes façons possibles d'arranger les bits d'énergie.

Quand, en pensée, Bekenstein a jeté une bouteille de gaz chaud dans un trou noir, il a augmenté l'énergie du trou noir. En retour, cela signifie un accroissement de la masse et de la taille du trou noir. Si, ainsi que Bekenstein l'avait deviné, les trous noirs possèdent de l'entropie, comme celle-ci s'accroît en même temps que leur masse, on pouvait sauver la deuxième loi : l'entropie du trou noir augmenterait plus qu'assez pour compenser ce qui avait été perdu.

Avant d'expliquer comment Bekenstein a trouvé la formule pour l'entropie d'un trou noir, il me faut expliquer en quoi cette idée était si choquante – tellement que, si on l'en croit, Stephen Hawking l'a tout d'abord écartée comme un non-sens¹.

L'entropie décompte les autres arrangements possibles, mais les arrangements de quoi ? Si l'horizon d'un trou noir a aussi peu de signes distinctifs que le plus lisse des crânes chauves qu'on puisse imaginer, qu'y a-t-il à compter ? En suivant cette logique, un trou noir devrait avoir une entropie nulle. L'affirmation de John Wheeler, « Les trous noirs n'ont pas de poils », semble contredire directement la théorie de Bekenstein.

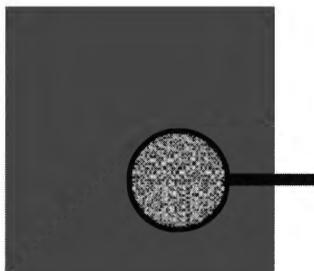
Comment réconcilier le maître et l'élève ? Laissez-moi vous donner un exemple qui va vous aider à comprendre. La partie imprimée sur une page comportant différentes nuances de gris est en réalité faite de minuscules points noirs et blancs. Supposons que nous disposions d'un million de points noirs et d'autant de blancs. Une configuration possible est de diviser la page en deux, horizontalement ou verticalement : une demi-page noire, l'autre blanche. Ce qui ne donne que quatre possibilités.



Nous voyons un motif solide, des distinctions acérées, mais seulement très peu de possibilités d'arrangements. Un tel cas est typique d'une faible entropie.

1. Il a décrit son scepticisme initial dans son livre *Une brève histoire du temps*.

Passons maintenant à l'autre extrême et répartissons au hasard les pixels noirs et blancs, en nombre égal, sur le même carré. Nous voyons un gris plus ou moins uniforme. Si les pixels sont vraiment petits, on aura l'impression d'un gris très uniforme. Il y a un nombre énorme de façons de réarranger les points noirs et blancs sans qu'on puisse faire la différence sans une loupe.



Nous voyons ici qu'une grande entropie va de pair avec une apparence uniforme, « chauve ».

L'association d'uniformité apparente et de grande entropie indique quelque chose d'important. Elle implique que le système – peu importe ce qu'il est – doit être composé d'un très grand nombre d'objets microscopiques qui 1) sont trop petits pour qu'on puisse les voir et 2) peuvent être réarrangés de multiples façons sans que l'apparence essentielle du système en soit affectée.

Comment Bekenstein a calculé l'entropie d'un trou noir

L'observation de Bekenstein disant que les trous noirs doivent avoir de l'entropie – en d'autres termes que, malgré leur apparente calvitie, ils détiennent de l'information cachée – est une de celles, simples mais profondes, qui changent d'un seul coup le cours de la physique. Quand j'ai commencé à écrire des livres de vulgarisation, on m'a fermement conseillé de limiter les équations à la seule : $E = mc^2$. On m'a prévenu que chaque équation supplémentaire ferait baisser les ventes de dix mille exemplaires. Franchement, cela va à l'encontre de mon expérience. Les gens aiment les défis ; ce qu'ils refusent, c'est qu'on les ennue. Après un grand moment d'introspection, j'ai décidé de prendre le risque. Le raisonnement de Bekenstein est d'une simplicité extraordinaire et d'une

telle beauté que ne pas l'inclure dans ce livre me donnerait l'impression d'en dévaloriser le contenu. Mais j'ai veillé à présenter les résultats de façon que le lecteur le moins porté sur les mathématiques puisse tranquillement omettre ces quelques équations sans perdre l'essentiel.

Bekenstein ne s'est pas directement posé la question de savoir combien de bits d'information pouvaient être cachés à l'intérieur d'un trou noir de taille donnée. Il s'est plutôt demandé quel changement affecterait la taille du trou noir si un simple bit d'information était jeté dedans. C'est la même chose que chercher de combien l'eau va monter dans la baignoire si une seule goutte d'eau est ajoutée ou, mieux encore, si un seul atome est ajouté.

Cela soulève une autre question : comment ajouter un bit unique ? Bekenstein doit-il lancer un simple point, imprimé sur un bout de papier ? Bien sûr que non : ce point est composé d'un nombre gigantesque d'atomes, tout comme le papier. Il y a bien plus d'information dans un point que dans un bit unique. La meilleure stratégie serait de jeter dedans une particule élémentaire.

Supposons, par exemple, qu'un seul photon tombe dans un trou noir. Mais même un seul photon peut transporter davantage qu'un simple bit d'information : en particulier, la connaissance du lieu exact où il a franchi l'horizon représente un bon paquet d'information. C'est là que Bekenstein a fait un usage astucieux du concept d'*incertitude* de Heisenberg. Il a dit que la position du photon pouvait être aussi floue que possible, pourvu seulement qu'il pénètre dans le trou noir. L'existence d'un tel « photon incertain » transporterait un unique bit d'information – à savoir qu'il est là, quelque part dans le trou noir.

Rappelez-vous ce que nous avons vu au chapitre 4 : le pouvoir de résolution d'un faisceau lumineux ne peut être meilleur que sa longueur d'onde. Dans ce cas particulier, Bekenstein ne cherchait pas à distinguer une tache sur l'horizon. Il voulait être aussi flou que possible. L'astuce a été d'utiliser un photon d'une longueur d'onde tellement grande qu'il se disperserait sur l'horizon tout entier. En d'autres termes, si l'horizon a un rayon de Schwarzschild R_s , ce dernier devrait être la longueur d'onde du photon. Vous pensez peut-être qu'il pourrait aussi bien avoir une longueur d'onde plus grande ? Mais alors il rebondirait sur le trou noir et n'y serait pas piégé.

Bekenstein imaginait qu'un bit ajouté au trou noir lui donnerait un accroissement minuscule, un peu comme ajouter une molécule de caoutchouc à un ballon en augmenterait la taille. Mais calculer cet accroissement requiert quelques étapes intermédiaires. Commençons par en donner les grandes lignes.

1. Tout d'abord, nous aurons besoin de savoir de combien s'accroît l'énergie du trou noir quand on y ajoute un unique bit d'information. Cette quantité est, bien entendu, l'énergie du photon qui transporte le bit. C'est ce qu'il faudra trouver en premier.
2. Ensuite, nous aurons besoin de déterminer la variation de la masse du trou noir quand on y ajoute un bit. Pour cela, nous disposons de la fameuse équation d'Einstein :

$$E = mc^2$$

Mais nous devons la retourner pour qu'elle nous dise le changement de masse en termes d'énergie additionnelle.

3. Une fois la variation de la masse connue, nous pourrions calculer la modification du rayon de Schwarzschild en utilisant la même formule que Michell, Laplace et Schwarzschild (voir chapitre 2) :

$$R_s = 2 MG/c^2$$

4. Enfin, nous devons déterminer l'augmentation de l'aire de l'horizon. Pour cela, il nous faudra la formule qui donne l'aire d'une sphère :

$$\text{Aire de l'horizon} = 4 \pi R_s^2$$

Commençons donc par l'énergie du photon d'un bit. Comme je l'ai dit plus haut, la longueur d'onde du photon devrait être suffisamment grande pour qu'il puisse être n'importe où dans le trou noir. Cela signifie que sa longueur d'onde doit être de R_s . D'après Einstein, un photon ayant cette longueur d'onde a une énergie, E , donnée par la formule suivante¹ :

$$E = hc/R_s$$

Dans cette formule, h est la constante de Planck et c la vitesse de la lumière. Cela signifie que jeter un unique bit d'information dans notre trou noir accroîtra son énergie de hc/R_s .

1. La fréquence, f , d'un photon d'une longueur d'onde R_s est c/R_s . En utilisant la formule d'Einstein-Planck $E = hf$, on voit que l'énergie du photon est hc/R_s .

Étape suivante : calculer la variation de la masse du trou noir. Pour convertir l'énergie en masse, il nous faut diviser par c^2 , c'est-à-dire que la masse du trou noir augmentera de $h/R_S c$.

$$\text{Variation de la masse} = h/R_S c$$

Entrons quelques valeurs numériques dans cette formule pour voir quelle serait la variation de la masse d'un trou noir d'une masse solaire si l'on y ajoutait un unique bit d'information :

Constante de Planck, h	$6,6 \times 10^{-34}$
Rayon de Schwarzschild du trou noir, R_S	3 000 mètres
Vitesse de la lumière, c	3×10^8
Constante de Newton, G	$6,7 \times 10^{-11}$

Ainsi, ajouter un bit d'information à un trou noir d'une masse solaire augmentera la masse de ce dernier d'une quantité incroyablement petite :

$$\text{Augmentation de la masse} = 10^{-45} \text{ kilogramme}$$

Mais, comme disait l'autre, « c'est déjà quelque chose » !

Passons à l'étape trois – calculer la variation de R_S en utilisant la relation entre masse et rayon. Le calcul littéral donne :

$$\text{Augmentation de } R_S = 2hG/(R_S c^3)$$

Pour un trou noir d'une masse solaire, R_S est d'environ 3 000 mètres. En rentrant tous les nombres dans la formule, nous trouvons que le rayon augmentera de 10^{-72} mètre. C'est non seulement considérablement plus petit qu'un proton mais encore que la longueur de Planck (10^{-35} mètre). Avec une modification aussi petite, vous vous demandez peut-être pourquoi nous nous sommes embêtés à la calculer... Mais ce serait une erreur de l'ignorer.

L'étape finale est de parvenir à la variation de l'aire de l'horizon. Pour un trou noir d'une masse solaire, elle augmentera d'environ 10^{-70} mètre carré. C'est très petit mais, encore une fois, « c'est déjà quelque chose ». Et il y a plus : il se trouve que 10^{-70} mètre carré, c'est *le carré de la longueur de Planck*.

Est-ce un hasard ? Que se passerait-il si l'on essayait la formule sur un trou noir d'une masse terrestre (un trou noir gros comme une cerise) ou sur un trou noir d'un milliard de masses

solaires ? Essayez avec les nombres correspondants ou directement en faisant le calcul littéral. Quelle que soit la taille du trou noir, la règle est :

Ajouter un bit d'information à un trou noir quelconque augmentera l'aire de son horizon d'une unité d'aire de Planck, c'est-à-dire d'une longueur de Planck au carré.

D'une certaine façon, enfoui au cœur des principes de la mécanique quantique et de la relativité générale, il y a un lien mystérieux entre les bits indivisibles d'information et des bits d'aire à l'échelle de Planck.

Quand j'ai expliqué tout cela à mes étudiants de première année de médecine à Stanford, quelqu'un au fond de la salle a lâché un long soupir grave suivi d'un « Cooool ». C'est vraiment cool, mais c'est aussi profond et là gît probablement la clef du puzzle de la gravité quantique.

Imaginez-vous maintenant en train de construire le trou noir bit par bit, exactement comme on le ferait pour une baignoire en la remplissant atome par atome. À chaque bit d'information ajouté, l'aire de l'horizon augmente d'une unité de Planck. Une fois le trou noir achevé, l'aire de l'horizon sera égale au nombre total de bits d'information cachée dans le trou noir. C'était là le grand exploit de Bekenstein, résumé dans cet énoncé :

L'entropie d'un trou noir, mesurée en bits, est proportionnelle à l'aire de son horizon mesuré en unités de Planck.

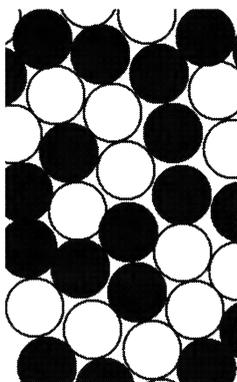
Plus succinctement :

Information égale aire.

On dirait presque que l'horizon est complètement recouvert de bits incompressibles d'information, plus ou moins de la même manière qu'un dessus de table pourrait être entièrement recouvert de pièces de monnaie.

Ajouter une pièce en augmenterait l'aire de celle d'une pièce. Bits, pièces : c'est le même principe.

Le seul problème avec ce dessin est qu'il n'y a pas de pièces sur l'horizon. Sinon, Alice les aurait trouvées quand elle est tombée dans le trou noir. D'après la théorie de la relativité géné-



rale, pour Alice tombant en chute libre, l'horizon est un invisible point de non-retour. Qu'elle puisse rencontrer quelque chose comme une table remplie de pièces s'opposerait au principe d'équivalence d'Einstein.

Cette situation tendue – l'incompatibilité apparente entre *l'horizon en tant que surface densément remplie avec des bits matériels* et *l'horizon en tant que simple point de non-retour* – a été le *casus belli* de la guerre du trou noir.

Il y a autre chose qui a laissé les physiciens perplexes après la découverte de Bekenstein : pourquoi l'entropie est-elle proportionnelle à l'aire de l'horizon et non au volume de l'intérieur du trou noir ? Il semble bien qu'il y ait à l'intérieur beaucoup de place gaspillée. En fait, un trou noir ressemble beaucoup à la bibliothèque de Ptolémée. Nous y reviendrons au chapitre 18 où nous verrons que l'univers est un hologramme.

Bien que Bekenstein ait eu la bonne idée – l'entropie d'un trou noir est effectivement proportionnelle à l'aire –, son raisonnement manquait de précision et il en était conscient. Il ne disait pas que l'entropie est *égale* à l'aire mesurée en unités de Planck : à cause de quelques incertitudes dans son calcul, tout ce qu'il pouvait dire est que l'entropie d'un trou noir est *à peu près égale* (ou proportionnelle) à l'aire. En physique, *à peu près* est une expression pas vraiment fiable : est-elle égale au double de l'aire ? À son quart ? Les raisonnements de Bekenstein, bien que brillants, n'étaient pas suffisants pour fixer le facteur de proportionnalité.

Au chapitre suivant, nous verrons comment la découverte de Bekenstein sur l'entropie des trous noirs a conduit Stephen Hawking à sa plus grande idée : non seulement les trous noirs ont de

l'entropie, comme Bekenstein l'a correctement conjecturé, mais ils ont aussi une température. Ils ne sont pas les objets infiniment froids, morts, que se figuraient les physiciens. Les trous noirs rayonnent grâce à une chaleur interne mais, en fin de compte, c'est cette chaleur qui provoque leur destruction.

Lumière noire

C'est dans les grandes villes que le vent d'hiver est le plus mauvais. Contenu par les canyons formés par les bâtiments à façade lisse, il se rue au coin des rues, secouant impitoyablement les infortunés piétons. Par un de ces méchants jours de 1974, j'étais dehors, courant à travers les rues glacées du nord de Manhattan, des glaçons de sueur pendant de mes longs cheveux. Après vingt-cinq kilomètres, j'étais épuisé mais il restait toujours trois regrettables kilomètres pour rejoindre mon bureau bien chaud. Sans mon porte-monnaie, je n'avais pas même les vingt *cents* nécessaires pour terminer en métro. Mais la chance m'a souri. Je descendais du trottoir du côté de Dyckman Street quand une voiture s'est arrêtée près de moi : Aage Petersen colla sa tête à la fenêtre. Aage était un merveilleux lutin danois qui avait été l'assistant de Niels Bohr à Copenhague avant de s'installer aux États-Unis. Amoureux de la mécanique quantique, il baignait dans la philosophie de Bohr.

Une fois que je fus installé dans la voiture, Aage me demanda si j'étais en chemin pour la conférence de Dennis Sciama à la Belfer School. Ce n'était pas le cas. En fait, je ne savais rien de Sciama ni de sa conférence. Je me voyais plutôt prendre un bol de soupe bien chaude à la cafétéria. Aage avait rencontré Sciama en Angleterre et m'expliqua qu'il s'agissait d'un personnage très drôle, un Anglais de Cambridge, qui, à coup sûr, émaillerait ses propos de nombreux bons mots. Aage pensait que la conférence avait un rapport avec les trous noirs – une trouvaille d'un des étudiants de Sciama et dont tout Cambridge bourdonnait. Je promis à Aage d'y faire un tour.

La cafétéria de la Yeshiva University n'était pas un endroit dont je raffolais. La nourriture n'y était pas mauvaise – la soupe

était cacher (ce dont je me fichais complètement) et chaude (ce qui comptait le plus) –, mais c'est la conversation entre les étudiants qui m'irritait : toujours à propos des lois. Pas les lois fédérales, ni celles de la ville ou encore les lois scientifiques : ce qui animait les discussions des jeunes étudiants en licence de la Yeshiva était la loi talmudique et la minutie avec laquelle elle coupe les cheveux en quatre : « Le Pepsi serait-il cacher s'il était fabriqué dans une usine construite sur le terrain d'un ancien élevage de cochons ? » « Et si le sol avait été recouvert de contreplaqué avant que l'usine ne soit construite ? » Ce genre de choses. Mais le froid du dehors et la chaleur de la soupe m'ont incité à lambiner et à laisser mes oreilles traîner à la table voisine occupée par quelques étudiants. Cette fois, le sujet de la conversation portait sur quelque chose qui intéresse tout le monde, moi compris : le papier de toilette ! Le débat talmudique faisait rage sur la question d'une importance capitale de savoir si les rouleaux de papier de toilette peuvent être réapprovisionnés pendant le Shabbat ou si l'on doit utiliser le papier d'un rouleau qui n'a pas été mis sur son dévidoir. De différents passages des écrits de Rabbi Akiba, une partie des étudiants avait conjecturé que le grand homme avait insisté sur une rigoureuse obédience à certaines lois qui interdisaient le réassort... L'autre fraction était persuadée que le grand Rambam¹ avait été très clair dans *Le Guide des égarés* : certaines tâches nécessaires étaient dispensées des injonctions talmudiques et une analyse logique montrait que le réapprovisionnement du papier de toilette en faisait partie. Quelques autres jeunes apprentis rabbis s'étaient jetés dans la mêlée avec de nouveaux arguments ingénieux, quasi mathématiques... et j'ai fini par me lasser de la discussion.

Vous vous demandez peut-être quel est le rapport avec les trous noirs qui sont le sujet de ce livre... Seulement ceci : ce badinage à la cafétéria m'a fait manquer quarante minutes de la brillante conférence de Dennis Sciama !

L'université de Cambridge, où Sciama enseignait l'astronomie et la cosmologie, était l'un des trois centres (avec Princeton et Moscou²) où « les meilleurs des meilleurs » confrontaient leurs capacités intellectuelles avec l'énigme de la gravité. Et, comme à

1. « Rambam » est le diminutif de Rabbi Moshe ben Maimon, plus connu des non-Juifs sous le nom de Maimonide.

2. Le grand centre sur la gravité de Moscou était dirigé par le légendaire astrophysicien et cosmologiste Iakov B. Zeldovitch.

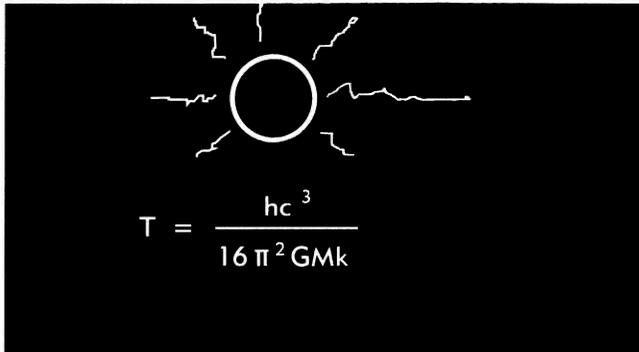
Princeton, ces jeunes combattants intellectuels étaient menés et inspirés par un leader charismatique. Ceux de la bande de Sciama formaient un groupe éblouissant de jeunes physiciens brillants parmi lesquels : Brandon Carter, celui qui a formulé le principe anthropique en cosmologie ; Sir Martin Rees, l'astronome royal de Grande-Bretagne, qui occupe aujourd'hui la chaire de Sir Edmond Halley (celui de la célèbre comète) ; Philip Candelas, l'actuel Rouse Ball Professor of Mathematics¹ d'Oxford ; David Deutsch, un des inventeurs de l'informatique quantique ; John Barrow, astronome distingué de Cambridge ; et George Ellis, le cosmologiste bien connu. Ah oui ! Et puis aussi Stephen Hawking, qui occupe actuellement la chaire de Newton à Cambridge. C'était en fait le travail de Stephen dont Dennis rendait compte en ce jour glacial de 1974 mais, à cette époque, ce nom ne me disait rien.

Quand j'arrivai à la conférence de Sciama, ce dernier en avait déjà achevé les deux tiers. Je fus immédiatement navré de ne pas être arrivé plus tôt. Tout d'abord, je ne me sentais pas de retrouver le verglas avec mon survêtement. Il faisait sombre et il ferait sans aucun doute encore plus froid quand Dennis en aurait fini. Mais il y avait plus que la peur des gelures qui me faisait souhaiter que Sciama en fût au début de sa conférence. Comme Aage l'avait dit, Dennis était un conférencier très drôle. Ses plaisanteries étaient excellentes mais, plus que tout cela, j'étais fasciné par l'équation unique qu'il y avait au tableau.

En général, à la fin d'une conférence de physique théorique, le tableau est couvert de symboles mathématiques. Mais Sciama était avare d'équations. Quand je suis arrivé, le tableau ressemblait à peu près à celui reproduit ci-contre.

En moins de cinq minutes, j'avais déchiffré ce que représentaient ces symboles. Il s'agissait en fait de notations standards pour des grandeurs familières de la physique. Mais j'en ignorais le contexte – ce que la formule décrivait –, bien que j'eusse pu dire

1. Le « Rouse Ball Professor of Mathematics » est un poste de professeur de mathématiques prestigieux existant dans les universités de Cambridge et Oxford. Candelas a pris la succession du grand mathématicien et physicien britannique Roger Penrose. Ces deux postes furent créés par un legs de Rouse Ball, mort en 1925, mathématicien et juriste, professeur au Trinity College de Cambridge, auteur d'une *Histoire des mathématiques* (1888, 1906-1907 pour la traduction française) et de *Récréations mathématiques et problèmes des temps anciens et modernes* (1892, 1907-1908-1909 pour la traduction française). Les traductions françaises de ces ouvrages ont été rééditées en fac-similé par les éditions Jacques Gabay. (N.d.T.)



qu'elle était ou bien très profonde ou bien complètement stupide. Elle n'était faite que de constantes parmi les plus fondamentales de la nature : la constante de Newton, G , qui gouverne les forces de gravité, était au dénominateur – un endroit curieux où la trouver ; c , la vitesse de la lumière, indiquait que la théorie de la relativité restreinte était impliquée ; la constante de Planck, h , lui donnait un parfum de mécanique quantique ; et puis il y avait k , la constante de Boltzmann. C'était la dernière à paraître aussi déplacée. Que diable pouvait-elle bien faire ici ? La constante de Boltzmann a un rapport avec la chaleur et l'origine microscopique de l'entropie. Qu'est-ce que l'entropie et la chaleur venaient faire dans une formule de gravité quantique ?

Que dire de ce 16 et de π^2 ? C'est le genre de nombres qui apparaissent dans toutes sortes d'équations. Rien à tirer de ce côté. M avait un côté familier et ce que disait Sciama renforçait mon impression sur son sens : il s'agissait bien de la masse. Encore une minute ou deux, et je pouvais affirmer qu'il s'agissait de la masse d'un trou noir.

D'accord ! Trous noirs, gravité, relativité : ça se tenait. Mais y ajouter de la mécanique quantique paraissait farfelu. Les trous noirs sont extrêmement lourds – aussi lourds que les étoiles qui les ont précédés. Or, la mécanique quantique s'intéresse à des objets petits : atomes, électrons, photons. Pourquoi l'introduire dans une discussion sur quelque chose d'aussi lourd qu'une étoile ?

Encore plus obscur, la partie gauche de l'équation représentait la température, T . La température de quoi ?

Les dernières quinze ou vingt minutes de la conférence de Sciama me suffirent pour compléter le puzzle. Un des étudiants de

Dennis avait découvert quelque chose de très curieux : la mécanique quantique donne des propriétés thermiques aux trous noirs – la chaleur – d'où découle la température. L'équation au tableau était une formule indiquant la température d'un trou noir.

Très curieux, me suis-je dit : qu'est-ce qui pouvait bien donner à Sciamia cette idée loufoque qu'une étoile morte, une étoile qui était complètement tombée en panne de carburant, pouvait avoir une température autre que le zéro absolu ?

En regardant cette curieuse formule, je vis une corrélation intéressante : la température d'un trou noir serait inverse de sa masse ; plus grande est la masse, plus basse serait la température. Un trou noir énorme, aussi grand qu'une grande étoile, aurait une minuscule température, bien plus basse que n'importe quel objet d'un quelconque laboratoire sur Terre. Mais la véritable surprise, celle qui m'a fait me lever de ma chaise, était que de minuscules trous noirs, si jamais ils existaient, seraient extrêmement chauds – plus chauds que ce que tout ce que nous avons jamais imaginé.

Mais Sciamia nous réservait une surprise encore plus grande : les trous noirs s'évaporent ! Les physiciens croyaient jusque-là que les trous noirs, comme les diamants, étaient éternels : une fois constitués, aucun mécanisme connu de la science ne pouvait les détruire ou les faire disparaître. Le vide noir de l'espace formé par une étoile morte se maintiendrait – indéfiniment froid, indéfiniment silencieux – pour l'éternité.

Mais Sciamia nous expliquait que les trous noirs s'évaporaient peu à peu jusqu'à disparaître, comme une goutte d'eau en plein soleil. Ainsi qu'il l'expliquait, le rayonnement électromagnétique de la chaleur évacue la masse d'un trou noir.

Pour que vous compreniez pourquoi Dennis et son étudiant pensaient cela, il me faut vous donner quelques explications sur la chaleur et son rayonnement. Je reviendrai aux trous noirs mais, d'abord, une petite digression.

Chaleur et température

Chaleur et température font partie des concepts les plus familiers de la physique. Nous avons tous un thermomètre et un thermostat incorporés : l'évolution nous a dotés de l'appareillage nécessaire à ressentir le froid et le chaud.

Le froid est l'absence de chaleur. Mais qu'est-ce exactement que cette chose appelée chaleur ? Qu'y a-t-il dans une baignoire remplie d'eau chaude qu'il n'y a plus quand l'eau du bain devient froide ? Si vous regardez avec attention au microscope les minuscules grains de poussière ou de pollen en suspension dans l'eau chaude, vous les verrez vaciller de gauche et de droite, tels des marins ivres. Plus l'eau est chaude, plus les grains paraissent agités. C'est Albert Einstein¹ qui, en 1905, expliqua le premier que ce mouvement brownien des grains est le résultat de leur bombardement incessant par des molécules chargées d'énergie circulant rapidement. L'eau, comme toutes les autres substances, est composée de molécules qui se déplacent ici et là, se cognant les unes les autres ainsi qu'aux parois du récipient, aux impuretés contenues dans le liquide. Quand ce mouvement est aléatoire et chaotique, nous l'appelons chaleur. Avec les objets ordinaires, quand vous ajoutez de l'énergie sous forme de chaleur, il en résulte une augmentation de l'énergie cinétique aléatoire des molécules.

La température est, bien entendu, en relation avec la chaleur. Quand les molécules zigzagantes touchent votre peau, elles excitent les terminaisons nerveuses et vous découvrez la notion de température. Plus l'énergie des molécules individuelles est grande, plus vos terminaisons nerveuses sont affectées et plus vous ressentez le chaud. Votre peau est simplement un des nombreux types de thermomètres sensibles et réagissant au mouvement chaotique des molécules.

Ainsi, approximativement, la température d'un objet est une mesure de l'énergie de ses molécules individuelles. Quand un objet refroidit, l'énergie en est extraite et ses molécules ralentissent. À la fin, quand de plus en plus d'énergie est évacuée, les molécules atteignent l'état d'énergie le plus bas possible. Si nous pouvions ignorer la mécanique quantique, cela se produirait quand le mouvement moléculaire a entièrement cessé. Alors, il n'y aurait plus aucune énergie à extraire, l'objet serait au zéro absolu. La température ne peut pas être abaissée en dessous de ce point.

1. En 1905, Einstein initia deux révolutions en physique et en acheva une troisième. Les deux révolutions nouvelles furent, bien sûr, la théorie de la relativité restreinte et la théorie quantique de la lumière (les photons). La même année, Einstein apporta la première preuve définitive de la théorie moléculaire de la matière avec son article sur le mouvement brownien. Les physiciens comme James Clerk Maxwell et Ludwig Boltzmann soupçonnaient depuis longtemps que la chaleur était le mouvement aléatoire des hypothétiques molécules de matière mais c'est Einstein qui en a apporté la preuve définitive.

Les trous noirs sont des corps noirs

La plupart des objets réfléchissent au moins un tout petit peu la lumière. Si la peinture rouge nous apparaît comme telle, c'est qu'elle réfléchit la lumière de cette couleur. Plus précisément, elle réfléchit une certaine combinaison de longueurs d'ondes que l'œil et le cerveau perçoivent comme rouge. Même chose pour la peinture bleue qui réfléchit une combinaison que nous ressentons comme étant le bleu. La neige est blanche parce que la surface des cristaux de glace réfléchit au même degré toutes les couleurs visibles. (La seule différence entre la neige et l'eau gelée formant miroir est que la structure granulaire de la neige disperse la lumière dans toutes les directions et éclate l'image réfléchiée en milliers de minuscules fragments.) Mais certaines surfaces ne réfléchissent presque pas de lumière. Toute lumière qui tombe sur la surface noircie d'une casserole est absorbée par la couche de suie, réchauffant à la fois l'extérieur noir et, en fin de compte, le métal lui-même. Ce sont les objets que notre cerveau perçoit comme noirs.



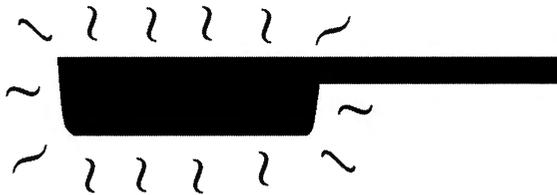
Le terme qu'emploient les physiciens pour désigner un objet qui absorbe totalement la lumière est *corps noir*. À l'époque où Sciamma donna une conférence à l'université où j'enseignais à New York, cela faisait longtemps que les physiciens savaient que les trous noirs sont des corps noirs. Laplace et Michell l'avaient soupçonné au XVIII^e siècle et la solution de Schwarzschild aux équations d'Einstein l'avait prouvé. La lumière, en tombant à l'horizon d'un trou noir, est complètement absorbée. L'horizon des trous noirs est ce qu'il y a de plus noir.

Mais ce que personne ne savait avant la découverte de Hawking était que les trous noirs avaient une température. Avant cela, si vous aviez demandé à un physicien : « Quelle est la température d'un trou noir ? », la première réponse aurait sans doute été : « Les trous noirs n'ont pas de température. » À quoi vous auriez pu rétorquer : « Absurde ! Tout a une température ! » Après un instant de réflexion, le verdict serait tombé : « D'accord : un trou noir n'ayant

aucune chaleur, sa température doit être au zéro absolu, la plus basse qui soit.» En fait, avant Hawking, tous les physiciens auraient affirmé que les trous noirs étaient des corps noirs, mais des corps noirs au zéro absolu.

Or, il est incorrect de dire que les corps noirs n'émettent absolument aucune lumière. Prenez une casserole recouverte de suie et chauffez-la à une centaine de degrés : elle rougeoiera. Plus chaude, elle prendra une teinte orangée, puis jaune pour finir par un blanc bleuté éclatant. Curieusement, d'après la définition des physiciens, le Soleil est un corps noir. Je vous entends déjà dire : « N'importe quoi ! », car vous ne pouvez rien imaginer qui soit plus loin d'un corps noir que le Soleil ! En fait, la surface du Soleil émet énormément de lumière, mais *elle n'en réfléchit aucune*. Pour un physicien, c'est la définition d'un corps noir.

Refroidissez la casserole chaude : elle émettra un rayonnement infrarouge invisible. Même les objets les plus froids émettent des rayonnements électromagnétiques tant qu'ils ne sont pas au zéro absolu.



Mais le rayonnement émis par les corps noirs n'est pas de la lumière réfléchi ; il est produit par des atomes se heurtant, ou en vibration, et, à la différence de la lumière réfléchi, sa couleur dépend de la température du corps.

Ce que Dennis Sciama expliquait était remarquable (en même temps que cela paraissait un peu fou). Il disait que les trous noirs sont des corps noirs mais *pas* au zéro absolu ; chaque trou noir a une température qui dépend de sa masse ; la formule était au tableau.

Il nous a expliqué encore une chose – d'un certain point de vue, la plus surprenante de toutes. Puisqu'un trou noir possède de la chaleur et une température, il doit émettre un rayonnement électromagnétique – des photons – de la même façon que le fait une casserole chaude. Il doit donc perdre de l'énergie. Or, selon la formule

d'Einstein $E = mc^2$, énergie et masse sont en réalité la même chose. Donc, en perdant de l'énergie, un trou noir perd aussi de la masse.

Cela nous amène à la chute de l'histoire de Sciama. La taille d'un trou noir – le diamètre de son horizon – est directement proportionnelle à sa masse. Si sa masse diminue, il s'ensuit qu'il en est de même de sa taille. Ainsi, en rayonnant de l'énergie, un trou noir rétrécit, jusqu'à ce qu'il ne soit pas plus grand qu'une particule élémentaire, puis disparaît. En suivant ce que disait Sciama, les trous noirs s'évaporent, comme une flaque d'eau en plein soleil.

Tout au long de la conférence, au moins de la partie dont j'ai été témoin, Sciama a été très clair sur le fait qu'il n'était pas à l'origine de ces découvertes. Ce n'était que « Stephen dit ceci », « Stephen dit cela ». Pourtant, mon impression, à la fin de la conférence, était que cet inconnu de Stephen Hawking était simplement un étudiant chanceux qui s'était contenté d'être au bon endroit au bon moment pour se greffer aux projets de recherche de Dennis. Il est classique de voir un physicien connu mentionner généreusement le nom d'un étudiant brillant lors d'une conférence. Il me paraissait évident que, brillantes ou farfelues, les idées étaient lancées par le physicien le plus « galonné ».

Ce soir-là, on me détrompa énergiquement. Avec Aage et quelques autres professeurs de physique de Belfer, nous emmenâmes Dennis à Little Italy, dans un bon restaurant italien. À la fin du repas, Dennis nous parla de son remarquable étudiant.

En fait, Stephen n'était pas étudiant du tout. Quand Dennis parlait de « son étudiant Hawking », il en parlait de la même façon qu'un père parlerait avec fierté d'un lauréat du prix Nobel en disant « mon petit ». En 1974, Stephen était une étoile montante dans le monde de la relativité générale à laquelle lui et Roger Penrose avaient apporté des contributions majeures. C'était ma simple ignorance qui m'avait laissé croire que Stephen était simplement l'étudiant d'un patron de thèse magnanime.

Tout en dégustant des plats italiens arrosés de bon vin, j'ai appris l'histoire stupéfiante, où la vérité dépasse la fiction, de ce jeune génie ayant éclos seulement après qu'on lui eut diagnostiqué une maladie dégénérative. Alors qu'il était un étudiant brillant et quelque peu narcissique – plus porté sur les sorties imbibées avec les copains que sur l'étude de la physique, selon Dennis –, Stephen développa la sclérose latérale amyotrophique, la maladie de

Charcot¹. La progression de cette dernière avait été rapide et il était, à l'époque de ce dîner, presque complètement paralysé. Bien qu'incapable d'écrire des équations et à peine capable de communiquer, Stephen tenait tête à la maladie tout en faisant jaillir des idées étincelantes. Le pronostic était sombre. La maladie de Charcot est une tueuse brutale et Stephen devait, au dire de tous, mourir dans les deux ans. En attendant, il s'amusait comme un fou, révolutionnant la physique joyeusement (le mot est de la bouche de Sciamia). À l'époque, je trouvais exagérée la description faite par Dennis du courage de Stephen face à l'adversité. Connaissant maintenant Stephen depuis presque vingt-cinq ans, je dirais au contraire que c'est tout à fait lui.

Je ne savais rien ni de Stephen ni de Sciamia ; je n'avais aucune idée à propos de l'évaporation des trous noirs : était-ce une vaste fumisterie, une spéculation folle de marginaux, ou une découverte authentique ? Il était possible que j'aie manqué une partie importante du raisonnement pendant qu'on faisait mon éducation sur les lois judaïques en matière de papier hygiénique. Plus vraisemblablement, Dennis avait rapporté les conclusions de Stephen sans fournir aucune preuve technique. Après tout, Sciamia n'était pas expert dans les méthodes les plus pointues de la théorie quantique des champs que Hawking avait utilisées. Et, comme je l'ai dit plus haut, il était avare d'équations.

Rétrospectivement, il paraît curieux que je n'aie pas fait le lien entre la conférence de Sciamia et la rapide conversation que j'avais eue deux ans auparavant avec Richard Feynman au West End Café. Feynman et moi avions aussi spéculé sur la façon dont les trous noirs pourraient finir par se désintégrer. Mais bien des mois passeront avant que je ne fasse la connexion.

Le raisonnement de Stephen

Selon ses propres dires, Stephen n'a pas cru, dans un premier temps, l'étrange conclusion à laquelle Jacob Bekenstein – l'étudiant de Princeton alors inconnu – était parvenu. Comment les

1. « *Lou Gehrig disease* » : la sclérose latérale amyotrophique, ou maladie de Charcot, est appelée aux États-Unis maladie de Lou Gehrig, du nom d'un joueur de base-ball américain renommé qui en est mort en 1941. C'est une maladie neurologique dégénérative qui se traduit, entre autres, par une atrophie musculaire. (*N.d.T.*)

trous noirs pouvaient-ils avoir de l'entropie ? Cette dernière est associée à l'ignorance – l'ignorance des structures microscopiques cachées, par exemple notre ignorance de la position précise des molécules d'eau dans un bain d'eau chaude. La théorie d'Einstein de la gravitation et la solution du trou noir de Schwarzschild n'avaient rien à voir avec des entités microscopiques. De plus, il semblait que tout fût connu à propos des trous noirs. La solution de Schwarzschild des équations d'Einstein était unique et précise. Pour chaque valeur de la masse et du moment cinétique, il y avait un et un seul trou noir solution. C'est ce que John Wheeler voulait dire en affirmant que « les trous noirs n'ont pas de poils ». Dans la logique usuelle, une configuration unique (rappelez-vous la BMW parfaite du chapitre 7) ne devrait avoir aucune entropie. L'entropie de Bekenstein paraissait absurde à Hawking... jusqu'à ce qu'il trouve sa propre piste de réflexion.

Pour Hawking, la clef était la température, pas l'entropie. En elle-même, l'existence d'entropie n'implique pas qu'un système possède une température¹. Une troisième grandeur, l'énergie, intervient aussi dans l'équation. Le lien entre énergie, entropie et température renvoie aux origines de la thermodynamique² au début du XIX^e siècle. C'était l'époque des machines à vapeur et le Français Nicolas Léonard Sadi Carnot était ce qu'on pourrait appeler un ingénieur thermicien. Il s'intéressait à des questions très pratiques : comment utiliser la chaleur contenue dans une quantité donnée de vapeur pour réaliser un travail utile de la façon la plus efficace – comment avoir le meilleur retour sur investissement. Dans son cas, travail utile pouvait vouloir dire accélérer une locomotive, ce qui nécessiterait de convertir de l'énergie thermique en énergie cinétique d'une grande masse d'acier.

L'énergie thermique est l'énergie désordonnée, chaotique du mouvement moléculaire aléatoire. À l'inverse, l'énergie cinétique d'une locomotive est organisée en un mouvement synchronisé d'une quantité énorme de molécules se déplaçant de façon cohérente. Le problème était donc comment transformer une quantité donnée d'énergie désordonnée en énergie cohérente. Seulement, en réalité, personne ne comprenait exactement ce que signifiaient

1. Logiquement, il est possible d'imaginer des systèmes qui peuvent être organisés de nombreuses façons sans que cela modifie leur énergie mais cela ne se produit jamais dans des situations du monde réel.

2. La thermodynamique est l'étude de la chaleur.

énergies cohérente et désordonnée. Carnot a été le premier à définir l'entropie comme une mesure du désordre.

J'ai eu ma première initiation à la notion d'entropie dans un module de licence consacré à la mécanique de l'ingénieur. Ni moi ni aucun autre étudiant ne connaissait quoi que ce soit sur la théorie moléculaire de la chaleur, et je parierais qu'il en était de même du professeur. Le cours – Mécanique supérieure 101 : thermodynamique pour ingénieurs mécaniciens – était si confus que, bien qu'étant de loin le meilleur étudiant du cours, je n'y comprenais goutte. Le pire était le concept d'entropie. On nous a expliqué que, si l'on chauffe quelque chose un petit peu, l'accroissement de l'énergie thermique divisé par la température donne l'accroissement de l'entropie. Nous avons tous noté cela, sans rien y comprendre. Pour moi, c'était aussi abstrus que « l'accroissement du nombre de saucisses divisé par l'oignonisation est appelé blanctourin ».

Une partie du problème venait du fait que je ne comprenais en réalité pas ce qu'était la température. Au dire de mon professeur, la température est ce qu'on mesure à l'aide d'un thermomètre. « Certes, aurais-je pu répliquer, mais qu'est-ce que c'est *exactement* ? » Je suis presque sûr que la réponse aurait été : « Je vous l'ai dit : ce que vous mesurez avec un thermomètre. »

Définir l'entropie en termes de température, c'est mettre la charrue devant les bœufs. Bien qu'il soit vrai que nous avons tous un sens inné de la température, ce sont les concepts plus abstraits d'énergie et d'entropie qui sont à définir d'abord : le professeur aurait dû commencer par expliquer que l'entropie est une mesure de l'information cachée et est exprimée en bits. Il aurait pu ensuite poursuivre en disant (correctement) :

La température est l'accroissement de l'énergie d'un système quand on y ajoute un bit d'entropie¹.

L'énergie change quand on y ajoute un bit ? C'est exactement ce que Bekenstein était parvenu à comprendre pour un trou noir. Apparemment, Bekenstein avait calculé la température d'un trou noir sans s'en rendre compte.

1. À strictement parler, c'est la température (mesurée à partir du zéro absolu) multipliée par la constante de Boltzmann. Cette dernière n'est rien d'autre qu'un facteur de conversion que les physiciens fixent souvent à un, en choisissant des unités commodes pour la température.

Hawking vit immédiatement ce que Bekenstein avait manqué mais l'idée qu'un trou noir puisse avoir une température lui paraissait tellement absurde que sa première réaction a été de rejeter comme tel tout à la fois entropie et température. Peut-être cette première réaction s'explique-t-elle en partie parce que l'évaporation d'un trou noir paraissait complètement ridicule. Je ne sais pas exactement ce qui a fait que Stephen est revenu sur tout cela, mais il l'a fait. En utilisant les mathématiques sophistiquées de la théorie quantique des champs, il a trouvé sa propre voie pour prouver que les trous noirs rayonnent de l'énergie.

L'expression *théorie quantique des champs* reflète la confusion qui régnait dans le sillage de la découverte des photons par Einstein. D'un côté, Maxwell avait prouvé de manière convaincante que la lumière est une perturbation de nature ondulatoire du champ électromagnétique. Lui et d'autres avaient imaginé l'espace comme quelque chose qui peut vibrer, un peu comme une assiette de gelée. Ils appelaient cette gelée hypothétique éther luminifère. Comme pour la gelée, des ondes partaient de la perturbation quand l'éther était ébranlé par une vibration (dans le cas de la gelée, la toucher avec un diapason fonctionnerait). Maxwell envisageait des charges électriques oscillantes perturbant l'éther et rayonnant des ondes de lumière. Les photons d'Einstein ont tout embrouillé pendant plus de vingt ans, jusqu'à ce que Paul Dirac finisse par appliquer la puissance des mathématiques de la mécanique quantique aux vibrations ondulatoires du champ électromagnétique.

Pour Hawking, la conséquence la plus importante de la théorie quantique des champs était cette idée que le champ électromagnétique a des « soubresauts quantiques » (voir chapitre 4), même s'il n'y a pas de vibration de charge pour le perturber. Dans le vide, le champ électromagnétique a des scintillations et des vibrations du fait des *fluctuations du vide*. Pourquoi ne les ressentons-nous pas ? Pas parce qu'elles sont très ténues : en fait, dans une petite portion de l'espace, elles sont extrêmement violentes. Mais le vide possède moins d'énergie que quoi que ce soit d'autre et il n'y a aucun moyen pour que celle de ses fluctuations nous soit transmise.

Dans la nature, il y a une autre sorte de soubresauts qui, elle, est *vraiment* très perceptible : les soubresauts thermiques. Quelle différence y a-t-il entre une casserole d'eau froide et une casserole d'eau chaude ? Vous allez me dire : la température. Mais ce serait

simplement une façon de dire qu'on ressent comme chaude l'eau chaude et froide l'eau froide... La différence véritable est que la casserole d'eau chaude contient davantage d'énergie et d'entropie – elle est remplie de molécules au mouvement aléatoire, chaotique, et dont il est bien trop difficile de conserver la trace. Ce mouvement n'a rien à voir avec la mécanique quantique et il n'a rien de subtil. Enfoncez votre doigt dans l'eau et vous verrez qu'il est très facile de détecter les fluctuations thermiques.

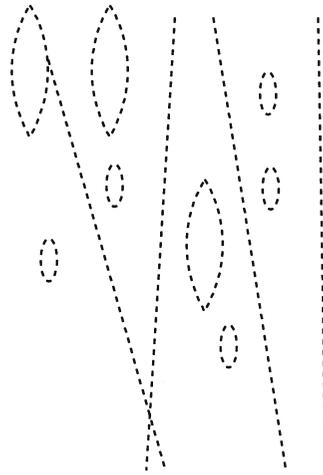
Le mouvement des soubresauts thermiques des molécules individuelles ne peut être vu parce que les molécules sont trop petites. Mais leur effet immédiat n'est pas difficile à repérer. Comme je l'ai dit plus haut, le mouvement de grains de pollen en suspension dans un verre d'eau chaude est aléatoire – ce sont les soubresauts du mouvement brownien – et il n'y a là rien de quantique. La cause est dans la chaleur de l'eau qui fait que les molécules de cette dernière bombardent les grains au hasard. Quand vous plongez votre doigt dans le verre, le même bombardement au petit bonheur se fait sur votre peau et excite les terminaisons nerveuses : vous ressentez que l'eau est chaude. Votre peau et vos nerfs absorbent un peu de l'énergie venant de la chaleur de l'environnement.

Même en l'absence d'eau, d'air ou de toute autre substance, les nerfs sensibles à la chaleur peuvent être excités par les vibrations thermiques du rayonnement d'un corps noir. Dans ce cas, les nerfs absorbent de l'énergie venant de l'environnement par absorption de photons. Mais cela n'est possible que si la température est au-dessus du zéro absolu. Au zéro absolu, les soubresauts quantiques des champs électrique et magnétique sont plus subtils et n'ont pas les mêmes effets flagrants.

Les deux sortes de soubresauts – thermique et quantique – sont très différentes et ne se mélangent pas dans les conditions ordinaires. Les fluctuations quantiques sont une partie indissociable du vide et ne peuvent être éliminées tandis que les fluctuations thermiques sont dues à un excès d'énergie. Les subtilités des fluctuations quantiques – les raisons pour lesquelles il nous est impossible de les ressentir et la manière dont elles diffèrent des fluctuations thermiques – sont à la limite d'« explicabilité » dans un livre tâchant d'éviter les équations trop complexes : toute analogie ou image que j'utiliserais présenterait des défauts de logique. Mais quelques explications sont nécessaires si vous souhaitez comprendre ce qui était en jeu dans la guerre du trou noir. Rappelez-

vous simplement l'avertissement de Feynman à propos des explications des phénomènes quantiques (voir p. 85).

La théorie quantique des champs suggère deux façons de se représenter les deux sortes de fluctuations. Les fluctuations thermiques sont dues à la présence de *photons réels*, ceux qui bombardent notre peau et leur transfèrent de l'énergie. Les fluctuations quantiques sont dues à des *paires de photons virtuels* qui sont créés puis vite absorbés par le vide. Voici un diagramme de Feynman d'espace-temps – le temps verticalement, l'espace horizontalement – avec à la fois des photons réels et des paires de photons virtuels.



Les *photons réels* sont figurés par les lignes d'univers non bornées en pointillé. Leur présence indique de la chaleur et des soubresauts thermiques. Mais si l'espace avait été au zéro absolu, il n'y aurait pas eu de photons réels. Seules resteraient les boucles microscopiques de *photons virtuels*, apparaissant et disparaissant en un flash. Les paires de photons virtuels font partie du vide – l'espace dans lequel nous pensons qu'il n'y a rien – même quand la température est au zéro absolu.

Dans les conditions ordinaires, il n'y a aucune confusion entre les deux sortes de soubresauts. Mais les conditions à l'horizon d'un trou noir ne sont pas ordinaires. Près de l'horizon, les deux sortes de fluctuations se mélangent d'une façon que nous n'aurions jamais soupçonnée. Pour avoir une idée de ce qui se passe, imaginez Alice en chute libre dans le trou noir dans un environnement dont la température est le zéro absolu : le vide parfait. Elle est

entourée de paires de photons virtuels, qu'elle ne remarque pas. Dans son voisinage, pas de photons réels.

Considérons maintenant Bob, qui flotte au-dessus de l'horizon. Pour lui, les choses sont plus compliquées. Quelques-unes des paires de photons virtuels – ceux qu'Alice ne remarque pas – peuvent être en partie à l'intérieur de l'horizon, en partie à l'extérieur. Mais une particule au-delà de l'horizon ne compte pas pour Bob. Bob voit un photon unique et n'a aucun moyen de reconnaître qu'il appartient à une paire virtuelle. Croyez-le ou non, un tel photon, échoué à l'extérieur de l'horizon pendant que son partenaire est de l'autre côté, affectera Bob et sa peau exactement de la même manière que s'il était un photon thermique réel. Près de l'horizon, la séparation entre thermique et quantique dépend de l'observateur : là où Alice décèle (ou pas) des soubresauts quantiques, Bob ressent de l'énergie thermique. Fluctuations thermiques et quantiques deviennent les deux faces d'une même pièce en ce qui concerne un trou noir. Nous reviendrons là-dessus au chapitre 20, quand nous nous informerons sur l'avion d'Alice.

À l'aide des mathématiques de la théorie quantique des champs, Hawking calcula que la perturbation des fluctuations du vide due aux trous noirs provoquait l'émission de photons, tout à fait comme si l'horizon d'un trou noir était un corps noir. Ces photons sont appelés *rayonnement de Hawking*. Plus intéressant, un trou noir émet un rayonnement comme si sa température était approximativement celle que le raisonnement de Bekenstein aurait fournie, si ce dernier était allé au bout. En fait, Hawking était à même d'aller plus loin que Bekenstein ; ses méthodes étaient si précises qu'il pouvait calculer la température exacte et, en retour, l'entropie d'un trou noir. Bekenstein s'était contenté d'affirmer que l'entropie était proportionnelle à l'aire de l'horizon mesurée en unités de Planck. Hawking n'avait désormais plus besoin d'utiliser la formulation ambiguë « proportionnelle à ». D'après ses calculs, l'entropie d'un trou noir est précisément un quart de l'aire de l'horizon mesurée en unités de Planck.

Accessoirement, l'équation grâce à laquelle Hawking déterminait la température d'un trou noir était celle qui était écrite au tableau quand j'étais arrivé à la conférence de Dennis Sciama.

$$T = \frac{1}{16\pi^2} \times \frac{c^3 h}{GMk}$$

Remarquez que, dans la formule de Hawking, la masse du trou noir est au dénominateur. Cela signifie que plus grande est la masse, plus froid est le trou noir et, inversement, plus petite est la masse, plus la température est élevée.

Essayons la formule sur un trou noir. Voici les valeurs des constantes¹ :

$$\begin{aligned}c &= 3 \times 10^8 \\G &= 6,7 \times 10^{-11} \\h &= 7 \times 10^{-34} \\k &= 1,4 \times 10^{-23}\end{aligned}$$

Prenons une étoile de cinq masses solaires qui finit par s'effondrer pour donner naissance à un trou noir. En kilogrammes, sa masse serait :

$$M = 10^{31}$$

Si nous rentrons tous ces nombres dans la formule de Hawking, nous obtenons pour la température d'un tel trou noir 10^{-8} kelvin. C'est une température très basse – environ dix milliardièmes de degrés au-dessus du zéro absolu ! Dans le monde ordinaire, il n'y a rien d'aussi froid : l'espace interstellaire, et même intergalactique, est bien plus chaud que cela.

Il y a des trous noirs qui ont des températures encore plus basses au centre des galaxies. Un milliard de fois plus massifs que les trous noirs stellaires et un milliard de fois plus lourds, ils sont aussi un milliard de fois plus froids. Mais il y en a aussi de bien plus petits. Imaginons qu'un événement cataclysmique broie la Terre. La masse de la Terre est environ un million de fois plus petite que celle d'une étoile. Le trou noir qui se serait formé aurait une température de 0,01 kelvin : plus chaude que celle d'un trou noir stellaire mais encore terriblement froide – plus que l'hélium liquide et beaucoup plus que l'oxygène liquide. La température d'un trou noir de la masse de la Lune grimperait à 1 kelvin.

Mais considérons maintenant ce qui arrive pendant qu'un trou noir émet le rayonnement de Hawking et s'évapore. À mesure que la masse décroît et que le trou noir rétrécit, la température aug-

1. Ces nombres sont exprimés en mètres, secondes, kilogrammes et kelvins. L'unité de mesure en kelvins est la même que sur l'échelle Celsius à ceci près qu'elle commence au zéro absolu au lieu du point de congélation de l'eau. La température ordinaire dans une pièce est de 300 kelvins.

mente. À terme, le trou noir deviendra chaud. Quand il finira par atteindre la taille d'un gros rocher, sa température sera parvenue à un milliard de milliards de degrés. Quand il aura atteint la masse de Planck, sa température sera de 10^{32} degrés. La seule fois où un endroit quelconque de l'univers a été à une telle température ce fut le début du Big Bang.

Le calcul de Hawking montrant comment les trous noirs s'évaporent était plus qu'un tour de force brillant. Je crois qu'avec le temps, quand les répercussions en seront totalement comprises, les physiciens y verront l'amorce d'une grande révolution scientifique. Il est encore trop tôt pour pouvoir dire aujourd'hui comment celle-ci se déroulera mais elle affectera les questions les plus profondes : la nature de l'espace-temps, la signification des particules élémentaires et le mystère de l'origine de l'univers. Les physiciens se demandent sans cesse si Hawking fait partie des plus grands physiciens de tous les temps et où il se situe dans leur hiérarchie. En réponse à ceux qui douteraient du génie de Hawking, je suggérerai seulement de relire son article de 1975 « *Production de particules par les trous noirs* ».

Mais génie ou pas, au moins à une occasion, Stephen Hawking a perdu ses bits : c'est ce qui a déclenché la guerre du trou noir.

Deuxième partie
Attaque surprise

Stephen a perdu ses bits, ne sait où ils habitent¹

*Comme je l'ai dit, c'est impossible ;
il s'ensuit que, à certains égards,
j'ai dû affirmer quelque chose de faux.*

SHERLOCK HOLMES²

D'après plusieurs articles de journaux, la guerre en Irak a duré plus longtemps que la Seconde Guerre mondiale. Ce que les journalistes veulent dire en réalité c'est qu'elle a duré plus que l'intervention américaine durant la Seconde Guerre mondiale. Cette dernière a commencé fin 1939 et ne s'est pas achevée avant l'été 1945 : les Américains ont tendance à oublier que la guerre était déjà dans sa troisième année quand Pearl Harbor a été attaqué.

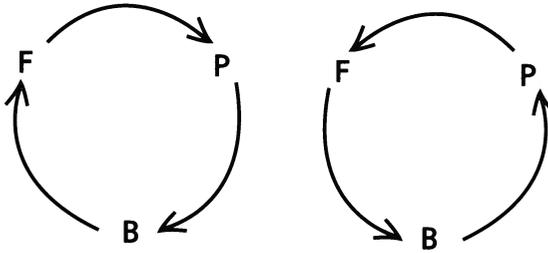
Il est possible que je sois en train de commettre le même type d'erreur égocentrique en disant que la guerre du trou noir a commencé en 1983 dans le grenier de Werner Erhard. L'attaque de Stephen remonte en réalité à 1976 : mais, pour qu'il y ait une guerre, il faut deux camps. Bien que largement ignorée, il s'agissait d'une attaque directe et frontale contre l'un des principes les plus ancrés de la physique : *la loi qui dit que l'information n'est jamais perdue* ou, dans sa forme plus ramassée, *la conservation de l'information*. Elle joue un rôle tellement central dans tout ce qui va suivre que nous allons y revenir une fois de plus.

1. « *How Stephen lost his bits and didn't know where to find them.* » Susskind adapte ici les paroles d'une comptine : « *Little Bo-Peep has lost her sheep/And can't tell where to find them.* » : « Crétinette a perdu ses moutons / Elle ignore où ils sont. » (N.d.T.)

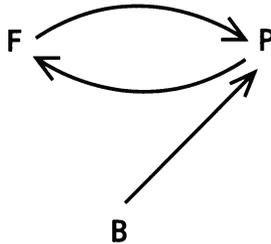
2. Sir Arthur Conan Doyle, *The Adventure of the Priory School*, « L'école du Prieuré », dans *Le Retour de Sherlock Holmes*. (N.d.T.)

L'information est éternelle

Que signifie « l'information est détruite » ? En physique classique, la réponse est simple : l'information est perdue si le futur perd la trace du passé. De façon surprenante, cela peut arriver même avec une loi déterministe. Reprenons notre pièce de monnaie à trois faces avec laquelle nous avons joué au chapitre 4. Nous avons appelé les trois faces : P, F et B (pour pile, face et base). Dans ce chapitre, je décrivais deux lois déterministes par les diagrammes suivants :



Les deux lois sont déterministes : quel que soit l'état dans lequel la pièce se trouve, il est possible de connaître avec certitude les états suivant et précédent. Comparez avec la loi décrite par cet autre diagramme :



ou par la formule

$$F \rightarrow P \quad P \rightarrow F \quad B \rightarrow P$$

Décrit avec des mots, cela donne : si la pièce est sur face, elle passera sur pile à l'instant suivant. Si elle est sur pile, elle passera à face. Et si elle est sur base, elle sera ensuite sur pile. La loi est complètement déterministe : quel que soit votre point de départ, le futur est décrit à jamais par la loi. Supposez, par exemple, que vous

commenciez par B. La suite est entièrement déterminée : B P F P F P F P F P... Si nous commençons par F, la suite sera : F P F P F P F P F P... Et si nous commençons par P, nous obtenons : P F P F P F P F P F...

Cette loi a quelque chose de curieux, mais quoi ? Comme pour toute autre loi déterministe, le futur est complètement prédictible. Mais, quand nous essayons de retrouver le passé, il y a une faille. Supposons que nous trouvions la pièce dans l'état F : nous pouvons être certains que l'état précédent était P. Jusqu'ici, tout va bien. Mais remontons d'une étape encore. Il y a deux états qui conduisent à P, précisément F et B. Il y a donc un problème : le F venait-il de P ou de B ? Nous n'avons aucun moyen de le savoir. Voilà ce que signifie perdre de l'information. Mais cela n'arrive jamais en physique classique. Les règles mathématiques sur lesquelles s'appuient les lois de Newton et la théorie électromagnétique de Maxwell sont formelles : tout état est précédé d'un état unique et suivi d'un état unique.

L'autre manière de perdre de l'information est la présence d'une dose de hasard dans la loi. Dans ce cas, il est évidemment impossible d'être certain du futur comme du passé.

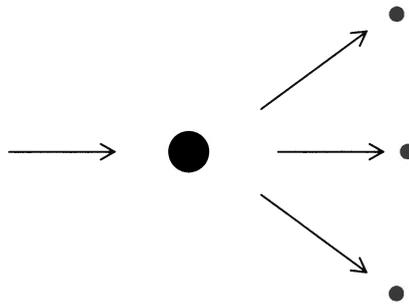
Ainsi que je l'ai expliqué plus haut, la mécanique quantique a une part de hasard, mais il y a aussi une raison profonde pour que l'information ne soit jamais perdue. J'ai illustré cela à l'aide d'un photon au chapitre 4, mais revenons-y en prenant pour exemple, cette fois, un électron entrant en collision avec une cible fixe comme un noyau lourd. L'électron vient de la gauche se déplaçant horizontalement.



Il entre en collision avec le noyau et s'éloigne dans une nouvelle et imprédictible direction. Un bon théoricien de la mécanique quantique peut calculer la probabilité avec laquelle il ira dans une direction précise mais il ne peut prévoir avec certitude laquelle l'électron prendra effectivement.

Il y a deux façons de vérifier si l'information concernant le mouvement initial a été gardée en mémoire. Les deux supposent de faire circuler l'électron en arrière en renversant la loi.

Dans le premier cas, un observateur relève où se trouve l'électron juste avant de renverser la loi. Il y a différentes façons de



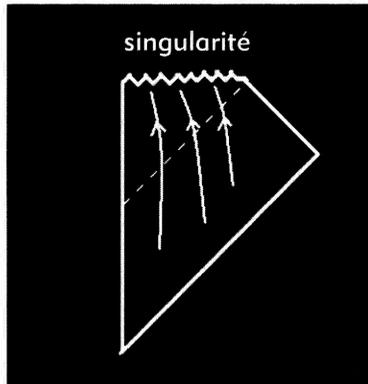
faire, la plupart utilisant des photons comme sondes. Dans le second cas, l'observateur ne se préoccupe pas de faire un relevé : il se contente de renverser la loi sans interagir de quelque façon que ce soit avec l'électron. Le résultat des deux expériences est entièrement différent. Dans le premier cas, une fois que l'électron est renvoyé en arrière, son mouvement est imprévisible et son point d'arrivée aléatoire. Dans le second cas, celui où aucun relevé n'a été fait, l'électron se retrouve toujours à faire le même mouvement à l'envers dans la direction horizontale. Quand l'observateur regarde l'électron pour la première fois après avoir commencé l'expérience, il le trouvera faisant exactement la même chose qu'au début mais à l'envers. Il semble bien que l'information ne soit perdue que lorsque nous intervenons activement sur l'électron. En mécanique quantique, tant qu'on n'interfère pas avec un système, l'information qu'il transporte est aussi indestructible qu'en physique classique.

Stephen attaque

Il aurait été difficile de trouver deux figures plus renfrognées que celle de Gerard 't Hooft et la mienne dans tout San Francisco en ce jour de 1983. Tout en haut de Franklin Street, dans le grenier de Werner Erhard, la guerre venait d'être déclarée – une attaque directe contre nos convictions les plus profondes. Stephen le Hardi, Stephen le Casse-cou, Stephen le Destructeur disposait de tout l'armement lourd et son sourire angélique/diabolique prouvait qu'il le savait parfaitement.

L'attaque ne fut en aucun cas personnelle. La guerre éclair visait directement le pilier central de la physique : l'indestructibi-

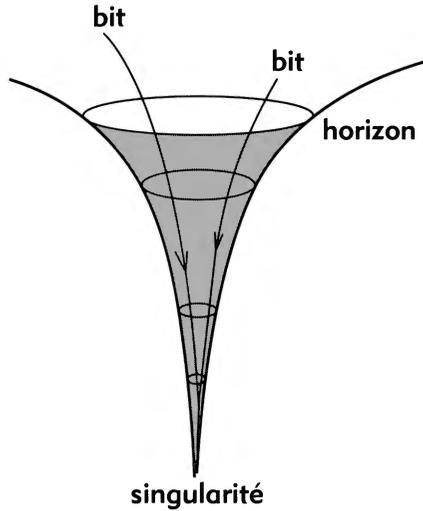
lité de l'information. L'information est souvent brouillée jusqu'à être méconnaissable. Mais Stephen expliquait que les bits d'information qui tombent dans un trou noir sont définitivement perdus pour le monde extérieur. Au tableau, il y avait le diagramme pour le prouver.



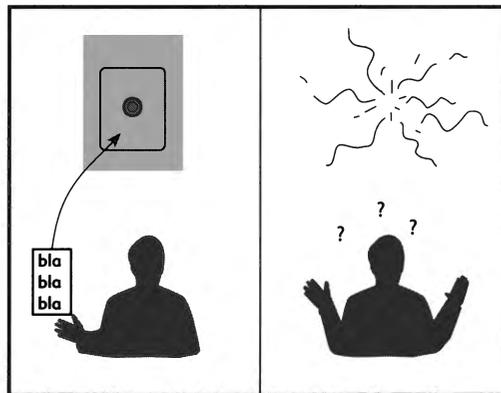
Pendant qu'il conduisait brillamment ses propres travaux sur la géométrie de l'espace-temps, Roger Penrose avait créé une façon d'afficher toutes les propriétés de ce dernier en un seul tableau, ou sur une seule feuille de papier. Même si l'espace-temps était infini, Penrose le déformait, le réduisant par des procédés mathématiques astucieux jusqu'à tout faire tenir dans une aire finie. Le diagramme de Penrose dessiné au tableau dans le manoir de Werner montrait des bits d'information tombant au-delà de l'horizon d'un trou noir. L'horizon était figuré par une ligne diagonale mince et une fois que chaque bit l'avait franchi, il ne pouvait pas en ressortir sans excéder la vitesse de la lumière. Le diagramme montrait aussi que chacun de ces bits était condamné à buter sur la singularité.

Les diagrammes de Penrose sont des outils indispensables pour les théoriciens de la physique, mais il faut un certain entraînement pour les comprendre. Page suivante, vous trouverez une représentation plus familière du même trou noir.

Le but de Stephen était simple. Les bits d'information qui tombent dans un trou noir sont exactement dans la même situation que les têtards dans la métaphore du chapitre 2 qui dépassent imprudemment le point de non-retour. Une fois qu'un bit a dépassé l'horizon, il n'y a plus aucun moyen de le récupérer dans le monde extérieur.



Ce n'est pas tant le fait que l'information pourrait être perdue au-delà de l'horizon qui nous troublait si profondément, 't Hooft et moi-même. Que l'information tombe dans un trou noir n'est pas pire à concevoir que de l'imaginer enfermée dans un coffre hermétiquement fermé. Mais il y avait quelque chose de bien plus sinistre qui se jouait là. Que de l'information puisse être cachée dans un coffre ne serait pas vraiment une cause d'alerte ; mais si, alors que la porte est fermée, le coffre s'évaporait là, juste sous vos yeux ? C'est exactement la prédiction de Hawking sur le devenir d'un trou noir.



En 1983, j'avais depuis longtemps fait le lien entre l'évaporation des trous noirs et la conversation que j'avais eue avec Richard

Feynman en 1972 au West End Café. L'idée que les trous noirs finissent par se désintégrer en particules élémentaires ne me gênait absolument pas. Mais l'affirmation de Stephen me laissait incrédule : *Quand un trou noir s'évapore, les bits d'information qu'il avait piégés disparaissent de notre univers. L'information n'est pas brouillée. Elle est annihilée de façon irréversible, définitive.*

Pendant que Stephen dansait joyeusement sur le tombeau de la mécanique quantique, 't Hooft et moi-même étions en plein désarroi. À nos yeux, une telle affirmation mettait en péril toutes les lois de la physique. L'union de la relativité générale et des lois de la mécanique quantique semblait aboutir à un déraillement.

Je ne sais pas ce qu'il en était pour 't Hooft, mais, dans le grenier de Werner, c'était la première fois que j'entendais exprimer les idées radicales de Stephen. Pourtant, à ce moment-là, ce n'était pas une nouveauté : Stephen avait très correctement fait ses devoirs et avait développé ses arguments dans un article plusieurs années auparavant. Il avait déjà pensé à tous les arguments que j'aurais pu mettre en avant pour échapper à son « paradoxe de l'information » et les avait contrés. Examinons quatre d'entre eux.

1. Les trous noirs ne s'évaporent pas réellement

Pour la plupart des physiciens, la conclusion sur l'évaporation des trous noirs était une grosse surprise. Mais la démonstration, bien que technique, était extrêmement convaincante. En étudiant les fluctuations quantiques très près de l'horizon, Hawking, aussi bien que Bill Unruh, avait prouvé que les trous noirs avaient une température et, à l'instar de n'importe quel autre objet chaud, devaient émettre des rayonnements de chaleur (des rayonnements de corps noir). Régulièrement, un article de physique paraissait affirmant que les trous noirs ne s'évaporaient pas mais il rejoignait vite le tas sans fin de ces articles de pacotille ressassant des idées marginales.

2. Les trous noirs laissent des vestiges

L'évaporation des trous noirs semblait solidement établie mais il restait le fait que, pendant qu'ils s'évaporent, ils se réchauffent et

rapetissent. À un certain stade, un trou noir en évaporation deviendrait si chaud qu'il émettrait des particules d'extrêmement haute énergie. À son dernier stade d'évaporation, les particules émises posséderaient une énergie allant bien au-delà de tout ce que nous avons pu rencontrer. Nous en savons très peu sur ce dernier sursaut. Peut-être le trou noir cesse-t-il de s'évaporer quand il atteint la masse de Planck (celle d'un grain de poussière). Arrivé là, son rayon serait de la longueur de Planck et personne ne peut être certain de ce qui se passe après. Logiquement, la possibilité existe que le trou noir cesse de s'évaporer et laisse un vestige – un coffre d'information miniature – avec toute l'information perdue enfermée dedans. En suivant cette idée, chaque bit d'information jamais tombé dans le trou noir subsisterait enfermé hermétiquement dans cette boîte scellée infiniment petite. Le minuscule vestige « planckien » aurait une propriété fantastique : ce serait une particule infinitésimale dans laquelle pourrait être cachée n'importe quelle quantité d'information.

Bien que cette idée des vestiges fût une alternative populaire à la destruction de l'information (en fait bien plus populaire que l'idée correcte), elle ne m'a jamais séduit. Elle semblait faite pour mettre le problème de côté. Mais il ne s'agit pas d'une simple question de goût ! Une particule qui pourrait cacher une quantité infinie d'information serait une particule possédant une entropie infinie. Son existence conduirait à un désastre thermodynamique : créée par des fluctuations thermiques, elle aspirerait toute la chaleur de n'importe quel système. À mes yeux, cette histoire de vestiges ne devait pas être prise au sérieux.

3. La naissance de bébés-univers

De temps à autre, je reçois des courriels qui commencent tous de la même manière : « Je ne suis pas un scientifique et ne connais pas grand-chose en physique et en mathématiques, mais je pense détenir la réponse au problème sur lequel vous et Hawkins [parfois c'est "Hawkings", ou encore "Haskins"] avez travaillé. » La solution proposée dans ces messages est presque toujours celle des *bébés-univers*. Quelque part, profondément enfoui à l'intérieur d'un trou noir, un morceau d'espace se détache et donne naissance à un minuscule univers contenu en lui-même et déconnecté de notre portion

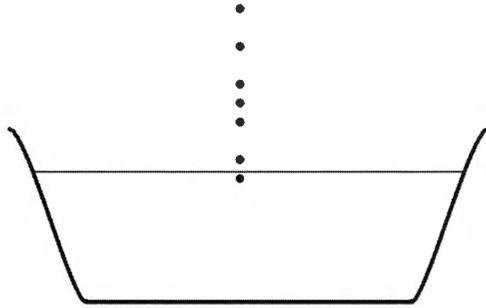
d'espace-temps. (Cela me fait toujours penser à ces ballons gonflés à l'hélium qui s'éclipsent pour disparaître.) L'auteur du courriel poursuit son argumentation en expliquant que toute l'information qui a pu tomber à l'intérieur du trou noir est enfermée dans le bébé-univers. Cela résout le problème : l'information n'est pas détruite ; elle est simplement en train de flotter dans l'hyper-espace, l'omni-espace, le méta-espace ou ce que vous voudrez comme lieu de villégiature pour bébé-univers. À la fin, une fois le trou noir évaporé, la faille dans l'espace se referme et, étant déconnectés, les bits d'information bloqués deviennent complètement inobservables.

Les bébés-univers ne sont pas forcément quelque chose de complètement idiot, particulièrement si nous supposons que les bébés grandissent. Notre univers est *vraiment* en expansion. Peut-être en est-il de même de chaque bébé-univers qui, en fin de compte, devient un univers mûr doté de galaxies, d'étoiles, de planètes, de chiens, de chats, de gens et de ses propres trous noirs. Il se peut même que notre univers soit né ainsi. Mais, comme solution à la question de l'information perdue, elle se contente d'éluder la question. On fait de la physique à partir d'observations et d'expériences. Si les bébés-univers emportaient l'information qui devient inobservable, le résultat pour notre monde serait exactement le même que si l'information avait été détruite, avec toutes les funestes conséquences que cela comporte¹.

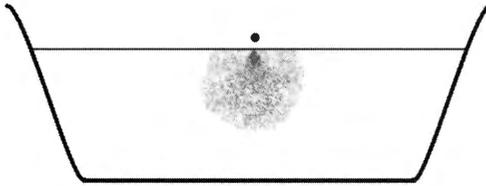
4. L'option de la baignoire

L'option de la baignoire est le moins populaire des arguments contre l'idée de Hawking. Les spécialistes des trous noirs et les théoriciens de la relativité générale l'ont récusée comme « manquant son but ». Malgré cela, c'était, à mes yeux, la seule chose qui se tenait. Imaginez des gouttes d'encre tombant dans une baignoire remplie d'eau porteuses du message suivant : drip, drip, drop, drip, drop, espace, drop, drip.

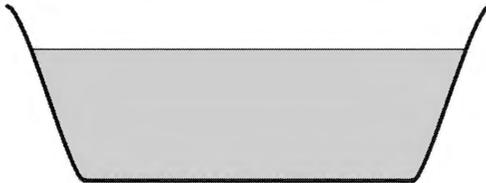
1. Au chapitre 1, j'ai brièvement mentionné l'une des pires conséquences : la perte de l'information implique un accroissement de l'entropie ce qui, en retour, signifie production de chaleur. Comme Banks, Peskin et moi-même l'avons montré, les fluctuations quantiques deviendraient thermiques et, presque instantanément, réchaufferaient l'univers à des températures tellement élevées que c'en est impossible.



Très vite, les gouttes bien nettes commencent à se dissoudre, le message devient plus difficile à lire – et l'eau commence à se troubler.

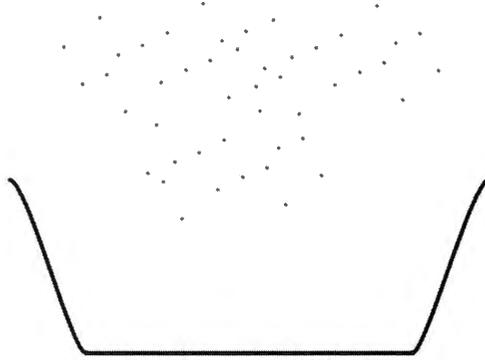


Après quelques heures, tout ce qui reste est une baignoire remplie d'une eau d'un léger gris uniforme.



Bien que, d'un point de vue pratique, le message soit désespérément brouillé, les principes de la mécanique quantique assurent qu'il est toujours présent au sein d'un nombre énorme de molécules se déplaçant de façon chaotique. Bientôt, le liquide commence à s'évaporer de la baignoire. L'une après l'autre, les molécules s'échappent dans l'espace vide – aussi bien l'eau que l'encre – pour finir par laisser la baignoire sèche et vide. L'information est partie ; mais a-t-elle été détruite ? Bien que brouillée bien au-delà de ce qui peut être récupéré par un quelconque dispositif pratique, pas un seul bit d'information n'a été effacé. Ce qui lui est arrivé est

évident : elle a été emportée dans les produits de l'évaporation – le nuage de molécules de vapeur qui s'est échappé dans l'espace.



Retournons aux trous noirs : qu'arrive-t-il à l'information qui était auparavant tombée dans un trou noir quand ce dernier s'évapore ? Si un trou noir est quelque chose comme notre baignoire, la réponse est la même : chaque bit d'information finit par être transféré aux photons et autres particules qui évacuent l'énergie du trou noir. Autrement dit, l'information est emmagasinée parmi les nombreuses particules qui forment le rayonnement de Hawking. 'T Hooft et moi-même étions certains que c'était bien cela qui se passait mais, parmi les spécialistes des trous noirs, personne ne nous a crus.

Voici une autre façon de comprendre le paradoxe de l'information de Stephen. Au lieu de laisser le trou noir disparaître, pendant qu'il s'évapore, nous pouvons le nourrir avec de nouveaux objets – des ordinateurs, des livres, des CD – exactement au rythme nécessaire pour l'empêcher de rétrécir. En d'autres termes, nous réapprovisionnons le trou noir avec un flux d'information pour l'empêcher de rapetisser. D'après Hawking, malgré la taille stable du trou noir (il s'évaporerait en même temps qu'il serait rempli), l'information serait engloutie, apparemment sans fin.

Tout cela me rappelle le numéro de cirque qu'enfant je préférais. J'adorais les clowns plus que tout et, de tous leurs numéros, celui qui me fascinait le plus était la blague de la voiture : je ne sais comment ils s'y prenaient, mais un nombre extraordinaire de clowns rentraient dans une toute petite voiture. Mais que diriez-vous si une équipe innombrable de clowns continuaient de monter dans la voiture sans que personne n'en ressorte ? Vous êtes

d'accord que cela ne pourrait pas continuer indéfiniment ? La capacité en clowns de n'importe quelle voiture est finie et, une fois la voiture saturée, quelque chose – clowns ou saucisses – devrait commencer à en ressortir.

L'information est comme les clowns et les trous noirs comme leurs petites voitures. Un trou noir d'une taille donnée ne peut contenir qu'un nombre maximal de bits. Vous pouvez désormais deviner que la limite est l'entropie du trou noir. Si le trou noir est comme n'importe quel objet, une fois rempli à la limite de sa capacité, ou bien le trou noir doit grandir, ou bien l'information doit commencer à s'échapper. Comment est-ce possible si l'horizon est vraiment un point de non-retour ?

Stephen était-il trop bête pour voir que le rayonnement de Hawking pourrait bien contenir l'information cachée ? Bien sûr que non ! En dépit de sa jeunesse, Stephen en savait sur les trous noirs au moins autant que quiconque, en tout cas bien plus que moi. Il avait réfléchi très sérieusement à l'option de la baignoire et avait de puissantes raisons de la rejeter.

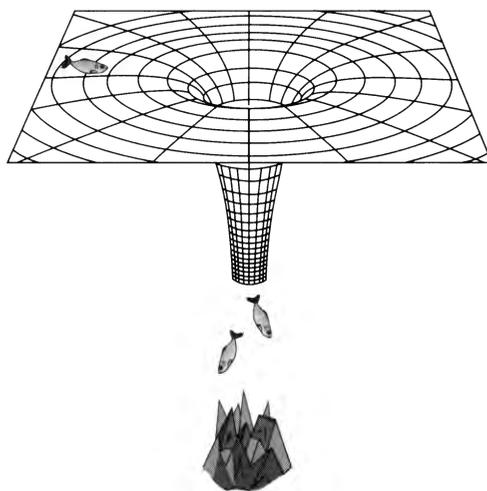
La géométrie d'un trou noir de Schwarzschild était parfaitement connue depuis le milieu des années 1970. Quiconque était familiarisé avec le sujet voyait l'horizon comme un simple point de non-retour. Tout comme l'analogie du drain, la théorie d'Einstein prédisait que celui qui dépasserait l'horizon par inadvertance ne remarquerait rien de particulier – l'horizon est une surface mathématique qui n'a pas de réalité physique.

Les deux choses les plus importantes qui ont été enfoncées dans la tête des spécialistes de la relativité sont les suivantes :

- Il n'y a aucun obstacle qui pourrait empêcher un objet de passer à l'intérieur d'un trou noir.
- Rien, pas même un photon – aucun signal d'aucune sorte – ne peut revenir d'au-delà de l'horizon. Cela supposerait excéder la vitesse de la lumière – ce qui est, selon Einstein, une impossibilité.

Pour que les choses soient bien claires, retournons au lac infini du chapitre 2 et au dangereux drain qu'il contient en son centre.

Imaginez un bit d'information flottant en aval. Aussi longtemps qu'il n'a pas franchi le point de non-retour, le bit peut être récupéré. Mais il n'y a pas de panneau d'avertissement au point de non-retour : le bit flottera jusqu'à le dépasser et, dès qu'il en sera ainsi,



il ne pourra plus retourner sans excéder la vitesse de la lumière. Le bit d'information est perdu à jamais.

Les mathématiques de la théorie de la relativité générale étaient tout à fait claires à propos de l'horizon des trous noirs : ils sont simplement faits de points de non-retour sans signe distinctif et ne présentent aucun obstacle à la chute des objets.

C'était là la logique qui avait été profondément enracinée dans la conscience de tous les théoriciens de la physique. C'était la raison pour laquelle Hawking était certain que les bits d'information non seulement tomberaient au-delà de l'horizon mais encore seraient perdus définitivement pour le monde extérieur. Voilà pourquoi, quand il a découvert que les trous noirs s'évaporent, Stephen a fait le raisonnement que l'information ne pouvait pas s'échapper avec le rayonnement. Elle serait conservée au-delà – mais au-delà où ? Une fois le trou noir évaporé, il ne resterait plus aucun endroit pour la cacher.

Je suis parti de chez Werner d'humeur massacrate. Il faisait très froid selon les standards de San Francisco et je n'avais qu'une veste sur le dos. Je ne parvenais pas à me rappeler où j'avais garé ma voiture et j'en voulais énormément à mes collègues. Avant de partir, j'avais essayé d'avoir une discussion avec eux à propos des arguments de Stephen. J'avais été surpris de leur apparent manque de curiosité et d'implication. Le groupe était essentiellement composé de physiciens spécialistes des particules élémentaires qui ne s'intéressaient pas beaucoup à la gravitation. Comme Feynman, ils

pensaient que l'échelle de Planck était si éloignée que la gravité ne pouvait décidément pas affecter les propriétés des particules élémentaires. Rome était en flammes, les Huns étaient à ses portes, mais personne ne l'avait remarqué.

Pendant que je rentrais chez moi, mon pare-brise s'est couvert de givre et le trafic était si dense qu'on se retrouvait sans cesse à l'arrêt sur la route 101. Je ne parvenais pas à me sortir l'affirmation de Stephen de la tête. La combinaison du trafic ralenti et du givre m'autorisait à scribouiller quelques diagrammes et une équation ou deux sur le pare-brise, mais je n'arrivais pas à voir une issue. Ou bien l'information était perdue, et il faudrait reprendre complètement les lois de base de la physique, ou bien il y avait quelque chose de fondamentalement faux dans la théorie de la gravitation d'Einstein à l'horizon d'un trou noir.

Comment 't Hooft voyait-il les choses ? Je dirais : très clairement. Sa résistance aux propos de Stephen a été sans ambiguïté. Je vais expliquer le point de vue de Gerard au prochain chapitre mais, auparavant, il me faut vous expliquer ce qu'est une « S-matrix », pour « scattering matrix », en français une matrice de diffusion, son arme la plus puissante.

Résistance hollandaise

Regardons l'histoire vers l'arrière – non pas la nôtre mais celle de quelque système solaire avec, au centre, une étoile dix fois plus lourde que le Soleil. Cela n'avait pas toujours été un système solaire : cela avait commencé par une nébuleuse de gaz géante, essentiellement formée d'atomes d'hydrogène et d'hélium, mais aussi d'un peu de tout ce qu'on trouve dans la classification périodique. De surcroît, il y avait quelques électrons libres et des ions. En d'autres termes, au début était un nuage de particules très diffus...

Puis la gravité amorça son œuvre. Sous son propre poids, le nuage commença à se contracter et, de ce fait, l'énergie potentielle gravitationnelle se transforma en énergie cinétique. Les particules commencèrent à se déplacer à une vitesse plus grande en même temps que l'espace qui les séparait s'amenuisait. En même temps qu'elle se contractait, la nébuleuse s'échauffa, à tel point qu'elle finit par s'allumer et donner naissance à une étoile. Mais tout le gaz n'avait pas été piégé par l'étoile : il en restait en orbite et il se condensa en planètes, astéroïdes, comètes et autres résidus.

Des dizaines de millions d'années passèrent avant que l'étoile ne manque d'hydrogène : le peu qu'il lui restait à vivre – peut-être quelques centaines de milliers d'années –, elle serait géante rouge. À la fin, elle mourut dans une violente implosion, formant un trou noir.

Ensuite, lentement, très lentement, le trou noir évacua sa masse sous forme de rayonnement : l'évaporation de Hawking l'éroda, son énergie s'échappant sous forme de photons et autres particules. Après un temps horriblement long – quelque chose comme 10^{68} ans –, le

trou noir disparut dans un sursaut final de particules de haute énergie. À ce moment-là, les planètes avaient depuis longtemps été désintégrées en particules élémentaires.

Des particules entrent, des particules sortent : voilà l'histoire à grande échelle. Toutes les collisions entre particules élémentaires, y compris celles qui se déroulent dans les laboratoires, commencent et se terminent de la même manière – des particules s'approchent, des particules s'éloignent – et il se passe quelque chose entre les deux. En quoi donc l'histoire stellaire à grande échelle, même si elle met en jeu temporairement un trou noir, est-elle fondamentalement différente de *n'importe quelle* collision entre particules élémentaires ? Gerard 't Hooft pensait qu'il n'y avait pas de différence et que cela pourrait bien être la clef pour voir en quoi Hawking se trompait.

Les collisions de particules – aussi bien les atomes que les particules élémentaires – sont mathématiquement décrites par un objet appelé matrice de diffusion (la « S-matrix »). Il s'agit d'un gigantesque tableau de toutes les entrées et sorties possibles dans une collision aussi bien que quelques grandeurs qui peuvent être traitées comme des probabilités. Il ne s'agit pas d'un tableau dans quelque livre énorme mais d'un être mathématique abstrait.

Un exemple : un électron et un proton se rapprochent l'un de l'autre le long de l'axe horizontal avec pour vitesse respectivement 20 et 4 % de celle de la lumière. Quelle est la probabilité pour qu'ils entrent en collision et qu'il en ressorte un électron et un proton ainsi que quatre photons supplémentaires ? La matrice de diffusion est un tableau mathématique contenant de telles probabilités – en fait, des amplitudes de probabilité – qui résument l'histoire quantique de cette collision. 't Hooft croyait profondément, tout comme moi, qu'une histoire stellaire complète – nébuleuse de gaz → système solaire → géante rouge → trou noir → rayonnement de Hawking – pouvait être résumée par une matrice de diffusion.

Une des propriétés les plus importantes de la matrice de diffusion est d'être *inversible*. Pour vous aider à comprendre la signification de ce terme, je vais vous donner un exemple tout à fait extrême. L'expérience de pensée fait intervenir la collision de deux « particules ». L'une d'elles est quelque peu inhabituelle : ce n'est pas une particule élémentaire – elle est composée d'un nombre gigantesque d'atomes de plutonium. En fait, cette particule terrible-

ment dangereuse est une bombe atomique avec un détonateur si sensible qu'un seul électron suffit à le déclencher.

L'autre particule de la collision est un électron. L'entrée initiale dans le tableau de la matrice de diffusion est « bombe et électron ». Qu'est-ce qui en ressort ? Des éclats. Une éruption violente d'un gaz brûlant d'atomes, de neutrons, de photons, de neutrinos. Bien entendu, la matrice de diffusion réelle devrait être incroyablement compliquée. Il faudrait dresser la liste des fragments en détail, avec leur vitesse et leur direction : une amplitude de probabilité serait alors assignée à chaque élément final de sortie. Une version extraordinairement simplifiée de la matrice de diffusion ressemblerait à quelque chose comme ceci¹ :

		Sortie			
		électron, proton et quatre photons	* * * *	éclats	plus d'éclats
Entrée	électron et proton	$0,002 + 0,321 i$			
	*				
	*		amplitudes de probabilité		
	*				
	*				
	*				
	électron et bombe			$0,012 + 0,002 i$	0,143

1. La véritable matrice de diffusion aurait un nombre infini d'entrées et de sorties et dans chaque case figurerait un nombre complexe.

Revenons à l'inversibilité : la matrice de diffusion a la propriété appelée « posséder un inverse ». Il s'agit d'une façon mathématique de décrire la loi affirmant que l'information n'est jamais perdue. L'inverse d'une matrice de diffusion est une opération qui défait ce que la matrice de diffusion a fait. Autrement dit, c'est exactement la même chose que ce que j'ai décrit plus haut en parlant de *renverser la loi*. L'inverse d'une matrice de diffusion fonctionne exactement à l'envers, de la sortie vers l'entrée. Vous pouvez aussi vous la représenter comme inversant le mouvement de toutes les particules finales et suivant le système à l'envers, tout à fait comme un film qu'on fait défiler en arrière. Si, une fois la collision achevée, vous appliquez cet inverse (faire défiler les choses à l'envers), les fragments vont se rassembler pour reformer la bombe initiale, y compris ses circuits de haute précision et ses mécanismes les plus délicats. Ah oui : vous récupérerez aussi l'électron original qui, maintenant, s'éloigne de la bombe. En d'autres termes, la matrice de diffusion ne se contente pas de prédire le futur à partir du passé, elle peut aussi reconstruire le passé à partir du futur. La matrice de diffusion est un code dont les détails assurent qu'aucune information n'est jamais perdue.

Mais l'expérimentation est très difficile. Une minuscule erreur – un photon perturbateur – détruira le code. En particulier, avant de renverser le cours de l'action, vous ne devez pas regarder une seule particule ou interférer avec elle de quelque manière que ce soit. Si vous le faisiez, au lieu de la bombe et de l'électron originels, tout ce que vous obtiendriez serait des éclats disposés de façon encore plus aléatoire.

Gerard 't Hooft mena la guerre du trou noir sous la bannière de la matrice de diffusion. Sa façon de voir était simple et directe : la formation puis l'évaporation d'un trou noir n'est qu'un exemple très complexe de collision de particules. Cela n'a rien de fondamentalement différent de la collision d'un électron et d'un proton en laboratoire. En fait, si l'on pouvait accroître l'énergie de la collision entre un électron et un proton dans des proportions considérables, on obtiendrait un trou noir. L'effondrement d'une nébuleuse de gaz n'est qu'un des processus de formation d'un trou noir. Avec un accélérateur suffisamment grand, deux simples particules entrant en collision pourraient créer un trou noir qui, une fois formé, s'évaporerait.

Pour Stephen Hawking, le fait que les propriétés de la matrice de diffusion impliquent la conservation de l'information prouvait

que ce n'était pas un bon outil pour décrire l'histoire d'un trou noir. Pour lui, les détails précis de la nébuleuse de gaz – qu'elle soit faite d'hydrogène, d'hélium ou de gaz hilarant – tomberaient dans le drain, dépasseraient le point de non-retour et disparaîtraient dans l'évaporation du trou noir. Le fait qu'il soit grumeleux ou onctueux, le nombre exact de particules dont il était formé : tous les détails de ce type seraient perdus à jamais. Inverser le cours des choses ne permettrait pas de reconstruire les données d'origine. D'après Hawking, inverser le rayonnement final ne ferait que produire un rayonnement de Hawking plus indifférencié encore.

Si Hawking avait raison, l'épisode complet – particules → trou noir → rayonnement de Hawking – ne pourrait pas être décrit par la technique mathématique habituelle de la matrice de diffusion. Stephen inventa donc un nouveau concept pour la remplacer. Le nouveau code devrait comporter un degré supplémentaire de hasard qui effacerait l'information originale. Pour remplacer la matrice de diffusion, en anglais la « scattering matrix » ou « S-matrix », Stephen inventa la « not-S-Matrix » qu'il écrivit : \$-matrix ; c'est ainsi qu'elle devint la *dollar-matrix*, la matrice-dollar.

Comme la matrice de diffusion, la matrice-dollar représente une règle de description de ce qui entre et de ce qui sort. Mais au lieu de conserver les différences inhérentes à des points de départ différents, dans le cas des trous noirs, elle les efface à tel point que peu importe ce qui est entré – Alice, une balle de base-ball, une pizza vieille de trois jours – quand on inverse, ce qui ressort est toujours la même chose : un rayonnement de Hawking indifférencié, et même si vous y avez jeté votre ordinateur et tous ses fichiers. Si vous inversez le sens de l'action, la matrice de diffusion fera ressortir l'ordinateur du trou noir mais la matrice-dollar laissera suinter encore plus de rayonnement de Hawking sans signe distinctif. Selon Hawking, toute mémoire du passé est perdue au cœur du trou noir éphémère.

C'était une impasse frustrante : Gerard disait : S-matrix ; Stephen disait : \$-matrix. Les arguments de Stephen étaient clairs et persuasifs mais la confiance de Gerard dans les lois de la mécanique quantique était inébranlable.

Peut-être, comme certains l'ont dit, Gerard et moi-même avons résisté aux conclusions de Stephen parce que nous étions des spécialistes de la physique des particules et pas de la relativité. Presque toute la méthodologie de la physique des particules tourne

autour de ce principe que les collisions entre particules sont régies par une matrice de diffusion inversible. Mais je ne crois pas que ce soit un quelconque chauvinisme de la physique des particules qui a sous-tendu notre refus d'en abandonner les règles. Une fois ouverte la porte de l'information perdue, la pagaille aurait été générale dans toute la physique et pas seulement celle des trous noirs. Le défi de Stephen aurait mis le feu à un paquet de dynamite théorique...

Cela dit, c'est peut-être le moment d'expliquer pourquoi les physiciens croient que l'explosion d'une bombe peut être inversée. Il n'est évidemment pas possible de s'y essayer au laboratoire. Mais imaginons qu'il soit possible de récupérer tous les atomes et les photons sortants et de les faire repartir à l'envers. Si l'on pouvait faire cela avec une précision infinie, les lois de la physique conduiraient à la reconstruction de la bombe. Mais une quelconque erreur, même minuscule – peut-être un seul photon, ou simplement une toute petite erreur dans la direction de l'un d'entre eux – s'avérerait désastreuse. Les erreurs infimes peuvent être amplifiées. Un seul spermatozoïde manquant sa cible, et l'histoire aurait pu en être bouleversée si ce spermatozoïde avait appartenu au père de Gengis Khan. Au billard, un changement infime sur la façon dont les billes sont empilées au départ ou sur la direction du premier coup¹ serait amplifié après quelques collisions et mènerait à des issues complètement différentes. Il en est de même avec l'explosion d'une bombe ou la collision d'une paire de particules de hautes énergies : une minuscule erreur en inversant le mouvement, et ce qui en sortira n'aura aucun rapport avec la bombe, ou les particules, d'origine.

Comment être sûr qu'une inversion parfaite des fragments reformera une bombe ? Nous le savons parce que les lois mathématiques fondamentales de la physique atomique sont inversibles. Ces lois ont été vérifiées à une précision à peine croyable dans des contextes bien plus simples qu'une bombe. Mais une bombe n'est rien d'autre qu'un ensemble d'atomes. Il est bien trop compliqué de suivre l'évolution de 10^{27} atomes pendant l'explosion, mais notre connaissance des lois atomiques est très fiable.

1. Il s'agit évidemment du billard américain où, au début de la partie, quinze billes numérotées sont toutes assemblées (dans un triangle ou un losange). Le premier joueur qui joue casse ce paquet en donnant le premier coup sur la seizième bille, une bille blanche placée en dehors du paquet formé par les autres qui partent alors dans toutes les directions. (*N.d.T.*)

Mais qu'est-ce qui remplace les atomes et les lois de la physique atomique quand l'explosion d'une bombe fait place à un trou noir en évaporation ? 'T Hooft avait beau avoir des idées brillantes sur la nature de l'horizon, il n'avait pas de réponse claire à cette question. Bien sûr, il savait qu'il faudrait remplacer les atomes par les minuscules objets qui constituent l'entropie de l'horizon. Mais que sont-ils exactement, et quelles sont les lois précises qui régissent la façon dont ils se déplacent, se combinent, se séparent, se recombinent ? 'T Hooft ne le savait pas. Hawking et la plupart des autres relativistes omettaient simplement l'idée d'un tel étayage microscopique, affirmant : « La deuxième loi de la thermodynamique nous dit que ces processus physiques ne peuvent pas être inversés. »

En fait, ce n'est pas ce que dit la deuxième loi. Elle dit seulement qu'inverser la physique est extrêmement difficile et que la plus petite erreur réduira tous vos efforts à néant. De plus, il est préférable de connaître les détails exacts – la microstructure – ou vous échouerez.

Ma propre façon de voir les choses en ce début de la controverse était que la bonne matrice était la S-matrix, pas la \$-matrix. Mais se contenter de dire « S, pas \$ » n'est pas très convaincant. La meilleure chose à faire était de tenter de découvrir cette mystérieuse origine microscopique de l'entropie des trous noirs. Et, par-dessus tout, il fallait absolument comprendre ce qui clochait dans le raisonnement de Stephen.

À quoi bon ?

Personne ne va jamais utiliser le rayonnement de Hawking pour soigner un cancer ou améliorer la machine à vapeur. On n'utilisera jamais les trous noirs pour emmagasiner l'information ou englober des missiles ennemis. Pis encore, contrairement à la physique des particules élémentaires ou à l'astronomie intergalactique – deux sujets qui, eux aussi, n'ont peut-être aucune application pratique –, la théorie quantique des trous noirs ne mènera jamais à une observation directe ou à des expériences. Dans ces conditions, pourquoi perdre son temps là-dessus ?

Avant que je ne vous l'explique, il me faut d'abord vous dire pourquoi nous avons bien peu de chances d'observer le rayonnement de Hawking. Admettons que, dans le futur, nous soyons capables de nous approcher suffisamment d'un trou noir astronomique pour en observer un certain nombre de détails. Même dans ces conditions, nous n'aurons aucune chance de le voir s'évaporer pour une raison très simple : aucun trou noir astronomique n'est actuellement en train de s'évaporer. Bien au contraire, ils sont tous en train d'absorber de l'énergie et de grossir ; le trou noir le plus isolé est entouré de chaleur. Les régions les plus vides de l'espace intergalactique, aussi froides soient-elles, sont encore bien plus chaudes qu'un trou noir d'une masse stellaire : l'espace est rempli d'un rayonnement de corps noir (des photons) remontant au Big Bang ; l'endroit le plus froid de l'univers est à la température suffocante de trois degrés au-dessus du zéro absolu tandis que les trous noirs les plus chauds sont cent millions de fois plus froids.

La chaleur – l'énergie thermique – va toujours du chaud vers le froid, jamais le contraire. Il s'ensuit que le rayonnement des

régions les plus chaudes de l'espace s'écoule dans les trous noirs les plus froids. Au lieu de s'évaporer et de rétrécir, comme ils devraient le faire si la température de l'espace était au zéro absolu, les trous noirs de la réalité sont constamment en train d'absorber de l'énergie et de grossir.

L'espace a été bien plus chaud qu'il ne l'est et l'expansion de l'univers le rendra plus froid dans l'avenir. Dans quelque cent milliards d'années, il finira par devenir plus froid que les trous noirs stellaires. À ce moment-là, les trous noirs commenceront à s'évaporer. (Y aura-t-il quelqu'un pour le voir ? Qui sait... mais soyons optimistes !) Même alors, l'évaporation sera extrêmement lente : il faudra au moins 10^{69} ans pour détecter un quelconque changement dans la masse ou la taille d'un trou noir. Il est donc improbable que qui que ce soit détecte un jour un trou noir en train de rétrécir. En fin de compte, même si nous disposions d'autant de temps que nous le voulions, nous n'aurions aucun espoir de décrypter l'information contenue dans le rayonnement de Hawking.

Si la déchiffrer est sans aucun espoir et qu'il n'y a aucune application pratique dans tout cela, pourquoi ce problème a-t-il fasciné tant de physiciens ? D'une certaine manière, la raison est très égoïste : nous cherchons à satisfaire notre curiosité sur la façon dont fonctionne l'univers et dont les lois de la physique s'ajustent entre elles.

En vérité, il en est de même de la plupart des domaines en physique. À l'occasion, des questions pratiques ont conduit à d'importants développements scientifiques. Sadi Carnot, l'ingénieur thermicien, a révolutionné la physique en essayant de construire une meilleure machine à vapeur. Mais, plus souvent, c'est la pure curiosité qui a conduit aux plus grands changements de paradigme en physique. La curiosité est comme une démangeaison : il faut qu'on gratte ! Et, pour les physiciens, il n'y a rien qui démange plus qu'un paradoxe, une incompatibilité entre les différentes choses qu'on pensait connaître. Ne pas savoir comment fonctionne quelque chose est déjà irritant. Mais trouver des contradictions au sein de ce que vous pensiez connaître est insupportable, particulièrement quand elles opposent des principes fondamentaux. Il est préférable d'examiner quelques-uns de ces conflits et la façon dont ils ont conduit la physique à des conclusions de la plus grande portée.

Les philosophes grecs de l'Antiquité ont laissé en héritage un paradoxe, un conflit entre deux théories incompatibles entre elles

régissant les phénomènes de deux mondes complètement séparés : les mondes céleste et terrestre. *Céleste* renvoie à ce que nous appelons astronomie. Le monde céleste est meilleur, immaculé, plus idyllique – un monde réglé comme une horloge, d'une précision parfaite. De fait, selon Aristote, tous les corps célestes se déplacent sur l'une des cinquante-cinq sphères de cristal parfaitement concentriques.

Par contraste, les lois des phénomènes terrestres sont condamnées à être altérées. Rien ne peut se mouvoir avec simplicité à la surface souillée de la Terre. Une lourde carriole bringuebalerait et s'arrêterait en grinçant à moins qu'un cheval ne continue à la tirer. C'est sans grâce que les blocs de matière tombent et demeurent au sol. Des lois de base régissent les quatre éléments : le feu s'élève, l'air stagne, l'eau tombe et la terre s'écroule le plus bas possible.

Les Grecs se satisfaisaient apparemment de ces deux ensembles de règles très différentes. Mais, pour Galilée et, plus encore, pour Newton, cette dichotomie était intolérable. Une simple expérience de pensée de Galilée réduisit à néant l'idée qu'il pouvait y avoir deux ensembles séparés de lois de la nature. Il s'imagina se tenant sur le haut d'une montagne en train de jeter une pierre : d'abord suffisamment fort pour qu'elle atterrisse à quelques mètres de ses pieds ; puis plus fort pour qu'elle puisse parcourir un millier de kilomètres avant d'atterrir ; enfin encore plus fort, jusqu'à faire le tour de la Terre. Il se rendit compte que la pierre se serait alors mise à tourner autour de cette dernière sur une orbite circulaire. Cela créait un nouveau paradoxe : comment les lois régissant les phénomènes terrestres pouvaient-elles être aussi différentes de celles régissant les phénomènes célestes si une pierre terrestre pouvait devenir un corps céleste ?

Newton, qui était né l'année de la mort de Galilée, résolut l'énigme. Il se rendit compte que c'était la même loi de la gravitation qui faisait tomber une pomme d'un arbre et maintenait la Lune en orbite autour de la Terre et celle-ci autour du Soleil. Ses lois du mouvement et de la gravitation furent les premières lois détaillées de physique à caractère universel. Newton savait-il à quel point elles seraient utiles aux futurs ingénieurs de l'aérospatiale ? Il est peu probable qu'il s'en soit préoccupé. C'est la curiosité et non l'esprit pratique qui le guidait.

La démangeaison suivante qui vient à l'esprit est celle que Ludwig Boltzmann gratta avec tant d'énergie. Encore une fois un

conflit entre principes : comment une loi à sens unique exigeant que l'entropie augmente toujours pouvait-elle coexister avec les lois inversibles sur le mouvement de Newton ? Si, comme le pensait Laplace, l'univers était fait de particules obéissant aux lois de Newton, il devait être possible de le faire fonctionner « à l'envers », c'est-à-dire en inversant le cours du temps. Boltzmann finit par résoudre le problème, d'abord en finissant par se rendre compte que l'entropie est de *l'information microscopique cachée* puis que ce n'est pas *toujours* que l'entropie augmente. De temps à autre, un événement inattendu se produit. Vous battez un jeu de cartes au hasard et, par pur coup de chance, il ressort numériquement parfaitement ordonné, les cœurs après les carreaux, les carreaux après les trèfles et les trèfles après les piques. Mais ces événements où l'entropie décroît sont de rares exceptions. Boltzmann résolut le paradoxe en affirmant que *l'entropie s'accroît presque toujours*. De nos jours, la vision statistique de Boltzmann sur l'entropie est à la base des sciences pratiques de l'information mais, pour lui, l'énigme de l'entropie n'était qu'une démangeaison terrible qu'il fallait gratter.

Il est intéressant de voir que, dans les cas de Galilée et Boltzmann, les conflits n'ont pas été révélés par de nouvelles et surprenantes découvertes expérimentales. Dans chaque cas, la clef se trouvait dans une judicieuse expérience de pensée. Le lancer de pierre de Galilée et les expériences qui inversaient le temps de Boltzmann n'ont jamais dû être effectués : il suffisait de les avoir pensés. Mais le grand maître des expériences de pensée a été Albert Einstein.

Deux contradictions profondément dérangeantes affectaient les physiciens au début du xx^e siècle. Le premier conflit opposait les principes de la physique newtonienne et la théorie de Maxwell de la lumière. Le principe de relativité, que nous associons si étroitement à Einstein, remonte en réalité à Newton et même, plus loin, à Galilée. Il s'agit simplement d'une affirmation sur les lois de la physique selon le cadre de référence d'où elles sont vues. Illustrons cela : imaginez un artiste de cirque – un jongleur – qui prend le train pour la ville suivante. Pendant que le train roule, il éprouve le besoin de s'entraîner un peu à jongler. Comme il ne l'a jamais fait dans un train en train de rouler, il se demande : « Aurai-je besoin de compenser le mouvement du train chaque fois que je lance une balle en l'air et la récupère ? Voyons un peu. Le train se déplace

vers l'ouest. Donc, chaque fois que je lance une balle, il me faut décaler la main légèrement à l'est pour la récupérer. » Il essaye donc avec une seule balle. Pendant qu'elle monte, il décale sa main vers l'est et plouf : la balle tombe par terre. Il essaie encore, en diminuant cette fois un peu son mouvement de compensation : de nouveau plouf !

Or, il se trouve que le train est d'excellente qualité. Les rails sont si lisses et les suspensions si efficaces que le mouvement du train est indécélable par les passagers. Le jongleur éclate de rire et se dit à lui-même : « J'ai compris ! Sans que je ne m'en rende compte, le train a ralenti et s'est arrêté. Jusqu'à ce qu'il reparte, je peux faire comme d'habitude. Je vais simplement en revenir aux bonnes vieilles lois de la jonglerie. » Et ça fonctionne parfaitement.

Imaginez sa surprise quand il regarde par la fenêtre et voit le paysage défiler à plus de 130 kilomètres à l'heure. Profondément intrigué, le jongleur interroge son ami le clown (qui se trouve être professeur de physique à Harvard pendant la saison creuse). Voici la réponse du clown : « Selon les principes de la mécanique newtonienne, les lois du mouvement sont les mêmes dans tous les référentiels pour autant qu'ils se déplacent avec une vitesse uniforme les uns par rapport aux autres. Voilà pourquoi les lois de la jonglerie sont exactement les mêmes dans le référentiel au repos du sol et dans celui qui se déplace tout en douceur du train. Il est impossible de déceler le mouvement du train par une expérience faite entièrement dans le train. Ce n'est qu'en regardant par la fenêtre qu'on peut dire que le train se déplace par rapport au sol – et même là, impossible de savoir si c'est le train ou le sol qui se déplace. » Stupéfait, le jongleur reprend ses balles et continue à s'entraîner.

Tout mouvement est relatif. Le mouvement du train avec sa vitesse de 130 kilomètres à l'heure, le mouvement de la Terre autour du Soleil à 30 kilomètres par seconde aussi bien que celui du système solaire autour de la galaxie à 200 kilomètres par seconde – tous sont indétectables du moment qu'ils se font en douceur.

En douceur ? Qu'est-ce que cela signifie ? Considérons le jongleur au moment où le train démarre et fait une brusque embardée vers l'avant. Non seulement les balles sont tirées en arrière mais le jongleur lui-même peut se retrouver par terre. Quand le train s'arrête, il se produit quelque chose du même ordre. Ou supposez

que le train aborde un virage serré. Il est clair que, dans toutes ces situations, les lois de la jonglerie doivent être modifiées. Quel est l'ingrédient nouveau ? L'*accélération*.

Accélérer signifie modifier la vitesse. Quand le train fait une embardée vers l'avant, ou quand il s'arrête brutalement, il y a un changement de vitesse, et donc accélération. Et quand il aborde un virage serré ? Cela peut paraître moins évident, mais il n'en reste pas moins qu'il y a modification de la vitesse – pas de sa valeur numérique mais de sa *direction*. Pour un physicien, n'importe quel changement affectant la vitesse s'appelle accélération, qu'il s'agisse de la valeur numérique ou de la direction. Le principe de relativité doit donc être précisé :

Les lois de la physique sont les mêmes dans tous les référentiels en mouvement rectiligne uniforme (sans accélération) les uns par rapport aux autres.

Le principe de relativité a été formulé pour la première fois quelque 250 ans avant la naissance d'Einstein. Alors, pourquoi Einstein est-il si célèbre ? Parce qu'il a mis en évidence un conflit apparent entre le principe de relativité et un autre principe de la physique que nous pourrions appeler le principe de Maxwell. Comme nous l'avons vu aux chapitres 2 et 4, James Clerk Maxwell a découvert la théorie moderne de l'électromagnétisme – la théorie de toutes les forces électriques et magnétiques existant dans la nature. La plus grande découverte de Maxwell a été de débrouiller le grand mystère de la lumière. La lumière, raisonna-t-il, consiste en ondes de perturbations électriques et magnétiques se déplaçant dans l'espace comme des ondes sur la mer. Mais, pour nous, ce que Maxwell a prouvé de plus important est que la lumière se déplace dans le vide toujours à la même vitesse : environ 300 000 kilomètres par seconde¹. C'est cela que j'appelle le principe de Maxwell :

Quelle que soit son origine, la lumière se déplace toujours dans le vide à la même vitesse.

Seulement, nous avons maintenant un problème : un conflit sérieux entre deux principes. Einstein n'était pas le premier à

1. À travers l'eau ou le verre, la lumière se déplace un peu moins vite.

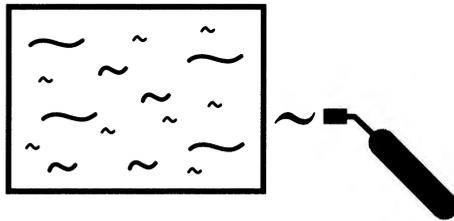
s'interroger à propos du conflit entre le principe de relativité et celui de Maxwell, mais il est celui qui l'a examiné le plus clairement. Et pendant que les autres étaient perturbés par les données expérimentales, Einstein – le maître des expériences de pensée – l'était par une expérience qui se déroulait entièrement dans sa tête. D'après ses propres souvenirs, en 1895, à l'âge de seize ans, Einstein conçut ce paradoxe : il s'est imaginé monté à bord d'un *train lancé à la vitesse de la lumière*, regardant une onde lumineuse se déplaçant avec lui dans la même direction. Est-ce qu'il ne verrait pas la lumière rester immobile ?

Il n'y avait pas d'hélicoptères du temps d'Einstein, mais nous pouvons l'imaginer flottant au-dessus de la mer, se déplaçant exactement à la même vitesse que les vagues de l'océan. Les vagues donneraient l'impression d'être immobiles. De la même manière, le jeune homme de seize ans se disait que le passager du train (rappelez-vous qu'il va à la vitesse de la lumière) verrait une onde lumineuse complètement immobile. Malgré son jeune âge, d'une façon ou d'une autre, Einstein en savait assez sur la théorie de Maxwell pour se rendre compte que ce qu'il était en train d'imaginer était impossible : le principe de Maxwell affirme que la lumière se déplace toujours à la même vitesse. Si les lois de la nature sont les mêmes dans tous les référentiels, alors le principe de Maxwell ferait aussi bien de s'appliquer au train en mouvement. Principe de Maxwell d'un côté, principe de relativité de Galilée et Newton de l'autre allaient droit au clash...

Einstein a gratté cette démangeaison pendant une décennie avant de voir comment s'en sortir. En 1905, il écrivit son article célèbre : « *Sur l'électrodynamique des corps en mouvement* » dans lequel il posa les principes d'une théorie entièrement nouvelle de l'espace et du temps – la théorie de la relativité restreinte. La nouvelle théorie changea radicalement les concepts de longueur et de durée, particulièrement ce que signifie la notion de simultanéité de deux événements.

Au moment où il se représentait la relativité restreinte, Einstein s'interrogeait sur un autre paradoxe. Au début du xx^e siècle, le rayonnement des corps noirs laissait les physiciens très perplexes. Rappelez-vous le chapitre 9 : j'y ai expliqué que le rayonnement des corps noirs était l'énergie électromagnétique produite par des objets rougeoyant. Imaginez un récipient complètement vide et au zéro absolu. L'intérieur est un vide parfait. Réchauffons mainte-

nant le récipient de l'extérieur. Un rayonnement de corps noir commence à être émis par les parois extérieures, mais aussi intérieures. Le rayonnement des parois intérieures se répand dans le vide du récipient et le remplit de rayonnement de corps noir. Les ondes électromagnétiques de toutes les différentes longueurs d'onde vibrent de tous côtés, rebondissant sur les parois intérieures : lumière rouge, bleue, infrarouge et de toutes les couleurs du spectre.



D'après la physique classique, chaque longueur d'onde – micro-ondes ; infrarouge ; ondes de lumière rouge, orange, jaune, verte, bleue et ultraviolette – devrait apporter la même quantité d'énergie. Mais pourquoi s'arrêter là ? Même les longueurs d'onde plus courtes – rayons X, rayons gamma, toutes les longueurs d'onde de plus en plus minuscules – devraient faire de même. Puisqu'il peut y avoir des longueurs d'onde aussi petites qu'on veut, la physique classique prédit qu'il y a une quantité *infinie* d'énergie dans le récipient. Ce qui est manifestement une absurdité. Une telle quantité d'énergie aurait instantanément vaporisé le récipient... Mais qu'est-ce qui clochait exactement ?

La situation créée par ce problème était si désastreuse que, à la fin du XIX^e siècle, on l'appela la *catastrophe ultraviolette*. Encore une fois, le problème venait du conflit entre deux principes dans lesquels on avait profondément confiance, chacun d'entre eux pouvant être très difficilement abandonné. D'un côté, la théorie ondulatoire accumulait les succès pour expliquer les propriétés bien connues de la lumière – diffraction, réfraction, réflexion et, plus impressionnant, interférences. Personne n'était prêt à abandonner la théorie ondulatoire mais, de l'autre côté, le principe que chaque longueur d'onde devrait avoir la même énergie, appelé le Principe d'équipartition de l'énergie, était une conséquence des aspects plus généraux de la théorie de la chaleur : en particulier le fait que la chaleur est un mouvement aléatoire.

En 1900, Max Planck a apporté quelques idées nouvelles et importantes qui n'étaient pas loin de résoudre le dilemme. Mais ce fut Einstein qui, en 1905, découvrit la réponse correcte. Sans aucune hésitation, l'employé inconnu du bureau des Brevets fit un pas d'une audace incroyable. La lumière, dit-il, n'est pas la traînée continue d'énergie imaginée par Maxwell. Elle est composée de particules indivisibles d'énergie, ou quanta, qu'on appellera plus tard photons. On peut seulement s'émerveiller de l'arrogance folle de ce jeune homme qui lançait à la face des plus grands scientifiques du monde que tout ce qu'ils savaient à propos de la lumière était faux.

L'hypothèse que la lumière est composée de photons indivisibles dont l'énergie est proportionnelle à leur fréquence résolvait le problème. En appliquant la mécanique statistique de Boltzmann à ces photons, Einstein trouva que les longueurs d'onde très courtes (les hautes fréquences) en ont moins qu'un photon unique. Moins que un signifie pas du tout. Ainsi, les très courtes longueurs d'onde ne transportent pas d'énergie et la catastrophe ultraviolette disparaissait. Mais cela n'était pas la fin de la discussion. Il faudra encore presque trente ans pour que Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger et Paul Dirac réconcilient les photons d'Einstein et les ondes de Maxwell. Mais la percée d'Einstein avait ouvert la voie.

La théorie de la relativité générale, le plus grand des chefs-d'œuvre d'Einstein, est aussi née d'une expérience de pensée à propos d'un conflit entre principes. L'expérience de pensée était si simple qu'un enfant aurait pu l'effectuer. Tout ce qu'elle mettait en jeu était un fait qu'on pouvait observer tous les jours : quand un train au repos accélère, les passagers sont repoussés vers l'arrière sur leurs sièges, tout à fait comme si le train avait été basculé vers le haut et que ce soit la gravité qui les aurait envoyés vers l'arrière du véhicule. Alors, qu'est-ce qui nous permet, demanda-t-il, de dire qu'un référentiel est accéléré ? Accéléré par rapport à quoi ?

Réponse d'Einstein transmise par le clown : « *Rien ne nous permet de le dire.* » « Quoi ?, s'exclama le jongleur, bien sûr que tu peux ! Ne viens-tu pas de me dire que vous aviez été repoussés contre le dossier de votre siège ? » « Oui, répondit le clown, mais cela aurait été exactement la même chose si quelqu'un avait basculé le train vers le haut et que ce soit la gravité qui repousse vers l'arrière. » Einstein se saisit de cette idée : il est impossible de distinguer accélération et effet de la gravité. Le passager n'a aucun

moyen de savoir si c'est le train qui est en train de démarrer ou si c'est la gravité qui le repousse vers l'arrière sur son siège. En dehors de tout paradoxe et de toute contradiction était né le principe d'équivalence :

On ne peut distinguer les effets de la gravité de ceux de l'accélération. Les effets de la gravité sur un quelconque système physique sont exactement les mêmes que ceux de l'accélération.

Encore et toujours, le même scénario. Au risque d'insister exagérément, les plus grandes avancées en physique ont été faites par des expériences de pensée qui ont révélé un conflit entre des principes auxquels on croyait profondément. De ce point de vue, le présent n'est pas différent du passé.

Le clash

Revenons à la question posée au début de ce chapitre : en quoi sommes-nous concernés si l'information est perdue dans l'évaporation d'un trou noir ?

Dans les jours et les mois qui ont suivi la rencontre dans le grenier de Werner Erhard, je commençais à me dire que Stephen avait mis le doigt sur un conflit entre principes qui rivalisait avec les grands paradoxes du passé. Quelque chose clochait sérieusement avec nos concepts les plus fondamentaux d'espace et de temps. Il était évident – Hawking l'avait dit lui-même – que le principe d'équivalence et la mécanique quantique étaient lancés l'un contre l'autre. Ou bien le paradoxe provoquerait la chute de tout l'édifice ou bien la réconciliation des deux pourrait conduire à une nouvelle compréhension pénétrante de chacun.

En ce qui me concerne, le conflit engendrait une insupportable démangeaison, mais qui n'était pas très contagieuse. Stephen semblait se satisfaire de sa conclusion sur la perte de l'information et, parmi les autres, bien peu semblaient se préoccuper du paradoxe. Pendant les dix années qui vont de 1983 à 1993, cette complaisance m'a beaucoup contrarié. Je ne pouvais comprendre comment chacun – et, par-dessus tous, Stephen – ne parvenait pas à voir que réconcilier les principes de la mécanique quantique et ceux de la relativité était la grande question de notre génération – la grande

opportunité de rendre compatibles les réussites de Planck, Einstein, Heisenberg et autres héros du passé. Je trouvais que Stephen était bouché de ne pas voir l'importance de sa propre question. Cela devint une obsession de convaincre Stephen et les autres (mais surtout Stephen) que la solution n'était pas d'abandonner la mécanique quantique mais de la réconcilier avec la théorie des trous noirs.

Il me paraît évident – et je suis sûr que Stephen, Gerard 't Hooft, John Wheeler et à peu près tous les relativistes, théoriciens des cordes et cosmologistes que je connais approuveraient – que disposer de deux théories de la nature incompatibles est intellectuellement intolérable et qu'il faut rendre la théorie de la relativité générale compatible avec la mécanique quantique. Il faut dire que les théoriciens de la physique sont une bande de chicaneurs¹...

1. Récemment, j'ai été très surpris de voir que tout le monde n'est pas d'accord. Dans une critique du livre de Brian Greene, *The Fabric of The Cosmos*^(*), Freeman Dyson a fait cette déclaration remarquable : « En tant que conservateur, je ne suis pas d'accord pour dire que la division de la physique en deux théories distinctes pour ce qui est grand et ce qui est petit est inacceptable. Je me satisfais de la situation dans laquelle nous avons vécu pendant les quatre-vingts dernières années, avec des théories séparées, l'une pour l'univers classique des étoiles et des planètes, l'autre pour l'univers quantique des atomes et des électrons. » Qu'est-ce que Dyson pouvait bien avoir en tête ? Qu'à l'instar des Anciens, avant Galilée, nous devrions accepter deux théories de la nature *irréconciliables* ? Est-ce cela être conservateur ? Ou être réactionnaire ? Cela résonne à mes oreilles comme un simple manque de curiosité.

(*) Traduit en français par Céline Laroche sous le titre : *La Magie du Cosmos* (Folio, 2007). (N.d.T.)

Pat¹

Quand j'étais jeune et que l'on me demandait – en particulier dans une réception ou à l'occasion d'une fête – quel était mon métier, je n'avais pas vraiment envie d'en parler. Non que j'eusse honte ou fusse embarrassé : c'est simplement que je trouvais cela trop difficile à expliquer. Pour éviter le sujet, je répondais : « Je suis physicien, spécialisé dans le nucléaire, mais je ne peux pas en parler. » Cela a fonctionné dans les années 1960 et 1970, mais plus aujourd'hui que la guerre froide est terminée.

J'ai encore du mal avec cette question, bien que pour des raisons différentes : je ne sais pas exactement quelle est la réponse... Celle, évidente, consistant en « Je suis un théoricien de la physique » appelle généralement une autre question : « Dans quelle partie de la physique travaillez-vous ? »... Et c'est là que je coince. Je pourrais dire que je travaille sur les particules élémentaires, mais j'ai aussi travaillé sur des objets comme les trous noirs et l'univers dans son ensemble. Je pourrais dire que je travaille en physique des hautes énergies, mais il m'arrive de travailler sur les énergies les plus basses, et même les propriétés du vide. Il n'y a tout simplement pas de nom approprié pour ce à quoi la plupart de mes amis et moi-même nous intéressons. Être appelé théoricien des cordes me contrarie : je n'aime pas être catalogué de façon si étriquée. J'aimerais pouvoir dire que je travaille sur les lois fondamentales

1. Pat est une situation du jeu d'échecs dans laquelle le joueur dont c'est le tour n'est pas en échec mais est dans l'impossibilité de bouger une pièce quelconque sans mettre son roi en échec, ce qui est interdit. C'est à lui de jouer mais il ne le peut pas : on a un « pat », la partie est considérée comme nulle, quelle que soit par ailleurs la situation sur l'échiquier. (*N.d.T.*)

de la nature, mais ça fait prétentieux. C'est pourquoi, la plupart du temps, je réponds que je suis un théoricien de la physique et ai travaillé sur de nombreux sujets.

En fait, avant le début des années 1980, la plupart de mes travaux auraient légitimement pu être classés en physique des particules élémentaires. Mais, vers ces années-là, on a commencé à y tourner un peu en rond. Le modèle standard de la physique des particules avait été mis au point, de même que ses variantes les plus intéressantes. Il ne restait plus qu'à attendre – longtemps – qu'on puisse construire des accélérateurs pour tester ces variantes. La vérité est que je m'ennuyais un peu et décidai de regarder du côté de la gravité quantique. Au bout de quelques mois, je commençais à craindre que Feynman n'ait raison : la gravité quantique était quelque chose de trop vague, trop lointain ; on n'y voyait pas de moyen de faire quelque progrès. Je ne voyais même pas clairement où se situaient les problèmes. John Wheeler, avec son style inimitable, aurait dit : « La question est... Quelle est la question ? » et je n'avais aucune idée de la réponse ! J'étais sur le point de retourner aux particules conventionnelles de la physique quand, tout d'un coup, Stephen lâcha la bombe qui apportait une réponse à la question de Wheeler – la question est : comment sauver la physique de l'anarchie de la perte de l'information ?

Si la physique des particules faisait du sur-place à cette époque, il en était de même de la théorie quantique des trous noirs, et la situation resta inchangée pendant neuf ans environ. Même Hawking n'a rien publié sur les trous noirs entre 1983 et 1989. Je n'ai réussi à trouver que huit articles parus dans toute cette période concernant la perte d'information dans les trous noirs. J'avais écrit l'un d'eux et 't Hooft tous les autres, essentiellement pour exprimer sa confiance dans la matrice de diffusion plutôt que dans la matrice-dollar de Hawking.

La raison pour laquelle je n'ai pratiquement rien publié sur les trous noirs pendant près de neuf ans après 1983 était que je n'avais tout simplement aucune idée sur la façon de résoudre l'énigme. Pendant ce temps, je me suis retrouvé dans des cercles à poser les mêmes questions encore et toujours, tombant à chaque fois sur les mêmes obstacles. La logique de Hawking était parfaitement claire : l'horizon est un simple point de non-retour et rien de ce qui le dépasse ne peut en revenir. Raisonnablement convaincant, mais conclusion absurde.

Voici comment j'ai présenté le problème lors d'une conférence faite à un groupe de physiciens amateurs et de fervents astronomes à San Francisco en 1988¹.

Une conférence à San Francisco : le paradoxe du très grand trou noir

Je voudrais attirer votre attention sur un conflit de principes sérieux qui a été décrit il y a environ treize ans par Stephen Hawking. La raison pour laquelle j'en reparle est qu'il révèle une crise qui doit être résolue avant que nous ne puissions espérer comprendre les questions les plus profondes de physique et de cosmologie. Ces questions mettent en jeu la gravitation d'un côté et la théorie des quanta de l'autre.

Mais pourquoi donc, me demanderez-vous, faudrait-il toujours mêler ces deux domaines d'expérience ? Après tout, la gravité s'occupe de tout ce qui est très grand et très lourd tandis que la mécanique quantique gouverne le monde de ce qui est très petit et de la lumière. Il n'y a rien qui soit à la fois lumière et très grand, alors comment les deux théories pourraient-elles importer toutes deux dans le même contexte ?

Commençons par les particules élémentaires. Ainsi que vous le savez tous, les forces gravitationnelles entre électrons et noyaux atomiques sont incroyablement faibles en comparaison des forces électriques qui assurent la cohésion des atomes. La même chose est vraie, peut-être plus encore, des forces nucléaires qui confinent les quarks dans un proton. En fait, la force de gravité est environ un million de milliards de milliards de milliards de milliards de fois plus faible que les forces habituelles. Il est donc clair que la gravité ne joue aucun rôle important en physique atomique ou nucléaire – mais qu'en est-il des particules élémentaires ?

D'ordinaire, nous nous figurons les particules tel l'électron comme des points de l'espace infiniment petits. Mais cela ne peut

1. Ce qui suit est une reconstitution approximative de la conférence appuyée sur des notes que j'ai toujours en ma possession. J'ai pris quelques libertés avec l'ordre pour remplacer les équations par des mots. L'histoire « *N'oubliez pas de prendre vos pilules antigravitationnelles* » était destinée à une revue de vulgarisation scientifique. Elle ne parvint jamais à sa forme finale mais, dans une version raccourcie, trouva place dans la conférence de San Francisco.

pas représenter toute la vérité. La raison en est que les particules élémentaires ont de nombreuses propriétés qui les rendent différentes les unes des autres. Certaines sont chargées électriquement, d'autres non. Les quarks ont des propriétés du nom de *nombre baryonique*, *isospin* ainsi que *couleur*, la mal nommée. Les particules tournent comme des toupies autour d'un axe. On ne peut raisonnablement pas penser qu'un simple point pourrait posséder tant de structures variées. La plupart d'entre nous, physiciens des particules, croyons que, si nous pouvions examiner les particules à une échelle extraordinairement petite, nous commencerions à voir la machinerie cachée qui les anime.

S'il est vraiment exact que les électrons et leurs différents cousins ne sont pas infiniment petits, ils doivent bien avoir une taille. Mais tout ce que nous savons par observation directe (en les lançant les uns contre les autres) est qu'ils ne sont pas plus grands qu'un millième de la taille du noyau atomique.

Mais des choses extraordinaires se produisent. Ces dernières années, nous avons accumulé des preuves indirectes que la machinerie qui se trouve à l'intérieur des particules n'est ni beaucoup plus grande ni beaucoup plus petite que la longueur de Planck. Or la longueur de Planck a une signification tout à fait remarquable pour un théoricien de la physique. Nous avons l'habitude de penser à la gravité comme étant tellement plus faible que les forces électriques et nucléaires qu'elle n'a strictement aucun rapport avec le comportement des particules élémentaires ; mais il n'en est pas ainsi quand les particules de matière s'approchent les unes des autres à une distance de l'ordre de la longueur de Planck. À cette échelle, la gravité est non seulement aussi puissante que les autres forces mais elle les dépasse.

Tout cela signifie que, tout en bas de l'univers – à des distances si petites que même les électrons sont des structures complexes –, la gravité pourrait bien être la force la plus importante maintenant la cohésion de toutes ces particules. Vous voyez donc que la gravité et la mécanique quantique pourraient bien agir de concert à l'échelle de Planck et expliquer les propriétés des électrons, des quarks, des photons et de leurs copains. Les spécialistes de la physique des particules que nous sommes auraient tout intérêt à mettre un peu d'ordre dans la gravité quantique.

Les cosmologistes aussi ne peuvent éviter la théorie quantique de la gravité que pour peu de temps. En remontant le fil du temps de

l'histoire de l'univers, nous savons qu'il était plus densément rempli de particules. Aujourd'hui, en 1988, les photons qui produisent le fond diffus cosmologique¹ sont séparés d'environ un centimètre mais, quand ils furent émis, ils étaient mille fois plus proches. Quand nous remontons le temps, les particules sont serrées comme des sardines dans des boîtes vraiment plus petites. Il paraît donc probable qu'à l'époque du Big Bang, ils n'étaient pas séparés de plus que la longueur de Planck. Si c'était bien le cas, les particules étaient si proches que les principales forces agissant entre elles étaient gravitationnelles. En d'autres termes, les mêmes forces de gravité quantique qui détiennent la clef des particules élémentaires pourraient aussi être les forces primitives responsables du Big Bang.

Et donc, une fois admis le fait que la gravité quantique est importante pour notre futur (et notre passé), que savons-nous d'elle ? Pas beaucoup plus que le fait que la théorie des quanta et la gravité sont en conflit sérieux, particulièrement à propos des trous noirs. C'est une bonne chose parce que cela veut dire que nous avons une chance d'en apprendre pas mal en résolvant ce conflit. Je vais aujourd'hui vous raconter une courte histoire qui montre le problème – pas la solution : juste le problème !

N'oubliez pas de prendre vos pilules antigravitationnelles

Année 8 419 677 599

Il y a bien longtemps, la Terre s'échappa de son orbite autour de l'étoile Sol, aujourd'hui morte. Après avoir erré pendant des générations sans nombre, elle trouva sa place, en orbite autour d'un trou noir géant, quelque part dans le superamas de Coma². La planète entière était gouvernée par la même corporation depuis la fin du XXI^e siècle, quand un coup d'État sans effusion de sang abandonna tout le pouvoir dans les mains de l'industrie pharmaceutique.

1. Le fond diffus cosmologique est le rayonnement émis à l'origine par le Big Bang.

2. Un superamas est une des plus grandes structures connues de l'univers. Les galaxies se regroupent en amas galactiques et ces derniers en superamas. Notre galaxie, la Voie lactée, fait partie de l'amas Local faisant lui-même partie du superamas de la Vierge. Le superamas de Coma, qui est l'un des plus proches du superamas de la Vierge, comporte en son sein deux amas importants – l'amas de la Chevelure de Bérénice, ou amas de Coma, et l'amas du Lion. Le superamas de Coma fut l'un des premiers à être identifié en tant que tel. (N.d.T.)

« Alors, Comte Géritol¹, où en sommes-nous ? Cela fait cinq ans que vous nous promettez de l'action. Allez-vous encore me faire perdre mon temps en me rapportant un autre "progrès" ?

— Je vous en prie, Votre Altesse royale, l'humble ver de terre incapable que je suis vous supplie de lui pardonner son irrémédiable stupidité mais, cette fois, les nouvelles sont vraiment bonnes : nous l'avons attrapé ! »

Son Altesse royale, l'empereur Merck² LLXXXVI, garda les sourcils froncés pendant un moment. Puis, tournant son énorme crâne chauve vers le comte – ministre de la Création de la fausse information et de la Mise en œuvre de la science antirationnelle –, il cloua ce dernier au mur de son regard perçant. « Fou que tu es ! Qu'as-tu attrapé ? Une morue ?

— Non, Votre Excellence. Il s'agit de l'Hérétique, l'Ennemi Numéro Un. Nous avons attrapé ce résolveur d'équations, fils d'un dégoûtant physicien, celui qui a infecté notre peuple avec cette rumeur infâme que les pilules antigravitationnelles sont frelatées. Il est en ce moment même enchaîné au mur dans l'antichambre. Dois-je le faire amener ? » La face de fouine du comte se tordit en un sourire obséquieux. « Je parie qu'il ferait mieux de prendre tout de suite un peu de Valium. Ha-ha-ha ! »

L'ombre d'un sourire se dessina sur le visage de Son Altesse royale. « Faites entrer ce chien ! »

Le prisonnier, blessé, en haillons mais toujours impénitent, fut jeté brutalement au sol aux pieds de Géritol. « Comment t'appelles-tu, chien, et quelle est ta famille ? » Se redressant sur ses pieds et brossant de manière provocante la poussière de sa tunique, le prisonnier regarda son persécuteur droit dans les yeux et répondit fièrement : « Je m'appelle Steve³. » Il se tut, les défiant longuement par son silence, bien trop longtemps pour le comte que

1. Le Geritol est un substitut vitaminé – assez ancien (1950) et très connu aux États-Unis – contenant du fer et supposé être bienfaisant pour les personnes âgées (Ger-i-tol : « ger », pour gériatrique, « i » pour *iron*, fer). Le nom appartient aujourd'hui au trust multinational pharmaceutique GlaxoSmithKline. (N.d.T.)

2. Le groupe Merck, du nom de la famille éponyme, est un des principaux groupes pharmaceutiques du monde, dont le siège est en Allemagne, à Darmstadt. Il emploie environ 30 000 personnes dans 50 pays. (N.d.T.)

3. À la fin du xx^e siècle, une bonne partie des physiciens dans le monde s'appelaient Steve. Steve Weinberg, Steve Hawking, Steve Shenker, Steve Giddings et Steve Chu furent parmi les nombreux Steve de la physique. À la fin du xxi^e siècle, ceux qui aspiraient à être les parents de grands physiciens commencèrent par appeler leurs enfants Steve – qu'il s'agisse de garçons ou de filles.

cela mettait au supplice. Puis il poursuivit : « Je suis issu d'une ancienne lignée dont les racines remontent à la guerre du trou noir. Mon ancêtre est Stephen le Hardi de Cambridge. »

Les traits de l'empereur s'assombrirent le temps d'un court flottement. Recouvrant tout son aplomb, il sourit : « Eh bien, Steve – je présume que docteur est le titre qui te convient –, regarde maintenant où ton lignage séculaire t'a conduit. Ton existence est une offense pour moi. La seule question est comment nous débarasser de ta présence. »

Plus tard, alors que le soleil artificiel se couchait à l'ouest, Steve fut conduit à son dernier repas. Comme pour se moquer de lui, l'empereur avait fait parvenir les plus beaux morceaux de choix de sa propre table accompagnés d'un message de « condoléances ». Tête baissée, le gardien de la prison était triste (Steve était apprécié par le personnel de la prison) et lui lut le message. Pour le gardien, les nouvelles étaient on ne peut plus mauvaises. « Dès demain, à la première heure, toi, ta famille et tous tes amis hérétiques serez placés à bord d'une petite planète habitable et envoyés, droit devant, dans l'abîme – dans les flammes sombres et la chaleur du gouffre géant qui surplombe le trou noir. Vous commencerez par ressentir l'inconfort de la chaleur. Bientôt, votre chair cuira et votre sang bouillira. Vos lambeaux se brouilleront avant de s'évaporer, irrémédiablement dispersés dans les cieux. » Sans raison apparente, les traits de Steve se relâchèrent en un vague sourire. « Une réaction bizarre à de bien mauvaises nouvelles », se dit le gardien de prison.

L'empereur et le comte se levèrent tôt le lendemain. L'empereur était amical, presque jovial. « Aujourd'hui, nous allons bien nous amuser ! N'est-ce pas votre avis, Comte ?

— Certainement, Votre Excellence. J'ai annoncé l'exécution. Cela constituera une excellente distraction pour le peuple de voir à travers les télescopes bouillir le sang des hérétiques. »

Inquiet d'obtenir l'approbation de l'empereur, l'obséquieux comte suggéra de vérifier rapidement une dernière fois la température du trou noir. « Oui, monsieur le Ministre, faisons cela. À cette distance, l'horizon paraît froid mais approchons de sa surface un thermomètre attaché à un câble et contrôlons la température près de lui. Bien entendu, cela a déjà été fait de nombreuses fois, mais j'aime voir le mercure grimper. » Un petit missile fut donc préparé pour emporter le thermomètre loin de la Terre. Une fois qu'il eut

quitté l'attraction terrestre, le thermomètre se mit à tomber vers l'horizon, emportant le câble derrière lui.

Le thermomètre tomba jusqu'à ce que le câble se tende. « Chaud, mais pas brûlant. Un peu plus bas, Comte », ordonna l'empereur. On déroula un peu le câble. À travers son télescope, l'empereur voyait le mercure grimper – dépassant le point d'ébullition de l'eau, celui du verre et du mercure – jusqu'à ce que le thermomètre soit vaporisé. « Est-ce suffisamment brûlant pour vous, Votre Altesse ? demanda le comte.

— Vous voulez dire pour Steve, Comte... Oui ! Je pense que le climat sera parfait. Allons : il est temps de procéder à l'exécution. »

Un peu plus tard, un second missile – cette fois suffisamment grand pour transporter deux cents personnes – fut apprêté pour conduire les malheureux hérétiques de la science rationnelle à un petit, mais accueillant, satellite. L'épouse de Steve, sanglotant de désespoir, s'accrochait fermement au bras de ce dernier. Le physicien était impatient d'expliquer la vérité mais il était trop tôt : les gardes de l'empereur se tenaient autour d'eux.

Quelques heures plus tard, ce fut le comte lui-même qui appuya sur le bouton qui alluma les énormes missiles qui arrachèrent le petit satellite bleu-vert de son orbite autour de la Terre. Avec ses deux cents passagers terrorisés (les gardes n'étaient plus avec eux), la petite colonie commença à plonger vers les flammes sombres.

« Je les vois, Comte !, remarqua l'empereur. La chaleur commence à les affliger. Ils deviennent léthargiques, leurs mouvements sont lents, très leeeeeents. » La coupole de l'observatoire était vaste et l'oculaire du télescope nécessitait une position des plus précaires. Le comte sourit, goba une pilule antigravitationnelle et en offrit une à l'empereur. « Par mesure de sécurité, Votre Altesse. La chute depuis cette position serait très désagréable. » Son Excellence avala la pilule et regarda à nouveau dans l'oculaire. « J'arrive encore à les voir. Mais regardez : ils commencent à tomber dans l'horizon étiré. Ça y est : mes loyaux sujets pourront voir comment mes ennemis sont hachés-brouillés. Regardez : les lambeaux de chacun d'eux plongent peu à peu dans la soupe dense et brûlante. Et, un à un, ils sont évacués par des photons. Comptons-les pour nous assurer qu'ils ont été complètement vaporisés. »

Ils surveillèrent pendant que, un à un, les photons étaient enregistrés et analysés par la banque de données géante du télescope.

« Ha !, s'exclama le comte. Tout à fait comme le prédisent les principes de la mécanique quantique. Tous les bits d'information sont bien là. Mais ils sont tellement brouillés que l'information ne peut pas être reconstituée. On n'est pas près de réparer le vase de Soissons ! »

L'empereur passa son bras autour des épaules du comte et dit : « Félicitations, Comte. Du bon travail, ce matin ! » Mais, par son geste irréflecti, il leur fit perdre l'équilibre. À une cinquantaine de mètres du sol, le comte se demanda brusquement si, après tout, la rumeur sur les pilules antigravitationnelles ne pouvait pas être fondée...

Steve se concentra sur son carnet. Regardant son épouse avec tendresse, il la serra dans ses bras. « Ma chère, nous allons bientôt dépasser l'horizon en toute sécurité. » Mme Steve et les autres étaient visiblement intrigués cependant que Steve poursuivait : « C'est le principe d'équivalence qui va nous sauver, expliqua-t-il. Il n'y a aucun danger à l'horizon. Ce n'est qu'un inoffensif point de non-retour. » Il ajouta : « Fort heureusement, nous serons en chute libre et notre accélération compensera exactement les effets de la gravité du trou noir. Nous ne ressentirons rien en traversant l'horizon. » Son épouse était toujours sceptique : « Eh bien, même si l'horizon est inoffensif, j'ai entendu des histoires horribles sur une singularité qu'on ne peut éviter à l'intérieur du trou noir. Ne va-t-elle pas nous broyer et nous réduire en poudre ?

— Oui, tout cela est vrai, répondit-il. Mais ce trou noir est tellement grand qu'il faudra à peu près un million d'années avant que notre planète ne se retrouve aux abords de la singularité. »

Et c'est ainsi qu'ils franchirent joyusement l'horizon – en tout cas il en fut ainsi si vous avez foi dans le principe d'équivalence.

Fin

Beaucoup de choses sont erronées dans cette histoire, sans même parler de ses qualités littéraires. Entre autres, si un trou noir était suffisamment grand pour que Steve et ses partisans puissent survivre de nombreuses années avant d'atteindre la singularité, il faudrait autant de temps au thermomètre du comte pour tomber à destination. Bien pis, le temps nécessaire pour que le trou noir émette les bits d'information qui composaient au départ Steve et ses partisans serait incroyablement long – bien plus long que l'âge

de l'univers. Mais, en laissant de côté ces détails numériques, les fondements de cette histoire sont plausibles.

Le sont-ils vraiment ?

Steve a-t-il été immolé à l'horizon ? Le comte et l'empereur ont dénombré chaque bit et tous se trouvaient dans ce que l'évaporation avait produit, « tout à fait comme le prédisent les principes de la mécanique quantique ». Steve a donc été détruit à l'approche de l'horizon. Mais l'histoire affirme aussi que Steve est passé en toute sécurité de l'autre côté, sans dommage pour lui ni sa famille – exactement comme le prédit le principe d'équivalence.

Nous avons à l'évidence un conflit de principes. La mécanique quantique affirme que tout objet est soumis à une zone extrêmement chaude juste au-dessus de l'horizon, où la température extrême dissocie toute matière en photons qu'elle renvoie sous forme de rayonnement, comme le Soleil le fait de la lumière. À la fin, chaque bit d'information doit être représenté dans ces photons.

Mais il semble que le principe d'équivalence a une histoire différente et quelque peu contradictoire à raconter.

Interruption du colloque le temps d'une parenthèse

Permettez-moi d'interrompre le déroulement de ce colloque de 1988 pour clarifier quelques points que les passionnés de physique de mon audience d'alors connaissaient, contrairement peut-être à certains d'entre vous. En premier lieu, pourquoi le principe d'équivalence donnait-il aux exilés confiance dans le fait que l'horizon était un environnement sûr ? Une expérience de pensée, que j'ai mentionnée au chapitre 2, aide à le comprendre. Imaginez la vie dans un ascenseur, mais dans un monde où la gravité est beaucoup plus forte qu'à la surface de la Terre. Si l'ascenseur est immobile, les passagers ressentent pleinement les forces gravitationnelles au bas de leurs pieds comme en chaque partie de leurs corps écrasés. Supposons que l'ascenseur commence à monter. L'accélération vers le haut empire la situation. D'après le principe d'équivalence, l'accélération ajoute une composante à la gravité que ressentent les passagers.

Mais que se passe-t-il si le câble de l'ascenseur casse brusquement et que l'ascenseur se met à accélérer vers le bas ? L'ascenseur et ses passagers sont en chute libre. Les effets de la gravité et

de l'accélération vers le bas se compensent exactement : les passagers ne peuvent pas dire qu'ils se trouvent dans un puissant champ gravitationnel – du moins tant qu'ils ne rencontrent pas le sol et ne subissent pas une violente accélération vers le haut.

De la même manière, les exilés sur leur planète en chute libre ne doivent pas ressentir les effets de la gravité du trou noir à l'horizon. Ils sont dans la situation des têtards à la dérive du chapitre 2 ne sachant pas qu'ils ont été emportés au-delà du point de non-retour.

Le deuxième point est moins familier. Comme je l'ai expliqué, la température de Hawking d'un grand trou noir est très basse. Pourquoi alors le comte et l'empereur enregistrent-ils une température aussi élevée près de l'horizon quand ils abaissent leur thermomètre ? Pour comprendre ce point, il nous faut savoir ce qui arrive à un photon pendant qu'il s'échappe d'un puissant champ gravitationnel. Mais commençons par quelque chose de plus familier – une pierre qu'on lance verticalement vers le haut depuis le sol. Si la vitesse qu'on lui communique n'est pas suffisante, elle retombera sur le sol. Mais pour peu qu'on lui transmette une énergie cinétique initiale suffisante, la pierre échappera aux limites de la Terre. Cela dit, même si elle réussit à s'échapper, elle se déplacera avec bien moins d'énergie cinétique qu'au départ. Ou encore, pour le dire autrement, la pierre avait bien plus d'énergie cinétique en partant que lorsqu'elle a fini par s'échapper.

Les photons se déplacent tous à la vitesse de la lumière, mais cela ne signifie pas qu'ils aient tous la même énergie cinétique. En fait, ils ressemblent beaucoup à la pierre. Quand ils quittent un champ gravitationnel, ils perdent d'autant plus d'énergie que le champ qu'ils doivent surmonter est intense. Quand un rayon gamma quitte une zone proche de l'horizon, son énergie s'est tellement dissipée qu'il s'est transformé en onde radio, de très faible énergie. Réciproquement, une onde radio observée loin d'un trou noir a dû être un rayon gamma, de haute énergie, quand elle a quitté l'horizon.

Revenons au comte et à l'empereur loin au-dessus du trou noir. La température de Hawking est si basse que les photons, de longueur d'onde des ondes radio, ont très peu d'énergie. Mais en y réfléchissant un tout petit peu, le comte et l'empereur se rendent compte que les mêmes photons avaient dû être des rayons gamma de très haute énergie quand ils ont été émis près de l'horizon. C'est

la même chose que de dire que plus bas, près de l'horizon, il fait plus chaud. En fait, la gravité est tellement forte à l'horizon d'un trou noir que les photons qui viennent de cette zone doivent avoir une énergie énorme pour s'échapper. Vu de loin, le trou noir peut être très froid mais, de très près, le thermomètre a été bombardé par des photons féroce-ment énergétiques. Voilà pourquoi les bourreaux étaient sûrs que leurs victimes seraient vaporisées à l'horizon.

Reprise du colloque

Il apparaît donc que nous sommes devant une contradiction. Un ensemble de principes – la relativité générale et le principe d'équivalence – nous dit que l'information continue son chemin sans interruption au-delà de l'horizon. Un autre, la mécanique quantique, nous fournit la conclusion opposée : les bits d'information en train de tomber, bien que sérieusement mélangés, finissent par ressortir sous la forme de photons et autres particules.

Et comment savons-nous, pourriez-vous demander, que les bits, après leur chute au-delà de l'horizon mais avant de rencontrer la singularité, ne peuvent pas retourner à travers le rayonnement de Hawking ? La réponse est évidente : pour le faire, il leur faudrait excéder la vitesse de la lumière.

Je vous ai exposé un paradoxe fort et je vous ai dit en quoi il pourrait bien s'avérer très important pour l'avenir de la physique. Mais je ne vous ai donné aucun indice sur la façon de résoudre le dilemme : parce que je ne sais pas comment. Mais j'ai quelques idées préconçues et je vais vous dire lesquelles.

Je ne pense pas qu'il faille abandonner ni les principes de la mécanique quantique ni ceux de la théorie de la relativité générale. En particulier, comme Gerard 't Hooft, je suis convaincu qu'aucune information n'est perdue dans l'évaporation d'un trou noir. Pour une raison ou une autre, quelque chose de très profond nous échappe à propos de l'information et de la façon dont elle se situe dans l'espace.

Cette conférence de San Francisco a été la première d'une série de beaucoup d'autres semblables que j'ai données dans les départements de physique ou dans des séminaires sur tous les continents. J'avais décidé que, à défaut de résoudre le mystère, je ferais du prosélytisme sur son importance.

Je me rappelle l'une d'entre elles particulièrement bien. Elle avait lieu à l'Université du Texas, un des plus importants départements de physique des États-Unis. Il y avait dans la salle un grand nombre de physiciens accomplis, y compris Steven Weinberg, Willy Fischler, Joe Polchinski, Bryce DeWitt et Claudio Teitelboim, qui, tous, avaient apporté des contributions majeures à la théorie de la gravité. Leur opinion m'intéressait au plus haut point, aussi, à la fin de la conférence, ai-je fait voter la salle. Si ma mémoire est bonne, Fischler, DeWitt et Teitelboim soutinrent les vues de la minorité, à savoir que l'information n'est pas perdue. Polchinski était convaincu par le raisonnement de Hawking et vota avec la majorité. Weinberg s'abstint. Dans son ensemble, le vote donna trois contre un en faveur de Hawking, mais il y avait une répugnance notable de la part des membres de l'assistance à prendre parti.

Pendant ce pat, le chemin de Stephen et le mien se croisèrent plus d'une fois. De toutes ces rencontres, celle qui ressort le plus eut lieu à Aspen.

Escarmouche à Aspen

Avant l'été 1964, je n'avais jamais vu de montagne plus haute que l'imposant mont Minnewaska (qui culmine à 900 mètres) dans les Catskill Mountains¹. Pour l'étudiant de troisième cycle de vingt-quatre ans que j'étais alors, Aspen, dans le Colorado², sur lequel je posais les yeux pour la première fois, était un royaume de montagne étrange et magique. Les hauts sommets couverts de neige qui entouraient la ville la paraient d'une atmosphère sauvage, irréaliste, particulièrement pour un garçon des villes comme moi. Bien qu'elle fût déjà une station de ski populaire, Aspen avait gardé un peu du côté pionnier de l'époque colorée des mines d'argent à la fin du XIX^e siècle. Les rues n'étaient pas pavées et, en juin, les touristes étaient si peu nombreux que vous pouviez camper à peu près n'importe où autour de la ville. C'était un endroit peuplé de personnages originaux. Dans n'importe quel bar, vous pouviez vous asseoir entre un authentique cow-boy américain et un rude montagnard mal rasé. Ou alors coincé entre un pêcheur crasseux et un berger polonais. Vous pouviez aussi engager la conversation avec l'élite du monde des affaires, le premier violon de l'orchestre d'étudiants de Berkeley ou un théoricien de la physique.

Blotti à l'extrémité ouest de la ville, entre Aspen Mountain au sud et Red Mountain au nord, se trouve un groupe de bâtiments bas

1. Les Catskill Mountains, comme le laisse entendre l'ironie de Susskind, ne sont pas exactement des montagnes mais plutôt un plateau très érodé situé dans l'État de New York, à l'ouest de New York. (*N.d.T.*)

2. Le nom d'Aspen, station de ski des montagnes Rocheuses à l'ouest des États-Unis, vient de l'abondance des trembles (en anglais : *aspen trees*) dans la région. (*N.d.T.*)

entourés d'une vaste étendue herbeuse. Aux beaux jours, on peut y voir une douzaine de physiciens assis à des tables de pique-nique, discutant, se disputant tout en profitant du beau temps. Le bâtiment principal de l'Institut de physique théorique d'Aspen n'en jette pas plein la vue mais, juste derrière, sur une jolie terrasse, il y a un tableau à l'ombre d'un auvent. C'est là que se passent les choses sérieuses, c'est là que quelques-uns parmi les plus grands théoriciens de la physique du monde se retrouvent à l'occasion de séminaires pour discuter de leurs dernières cogitations géniales.

En 1964, j'étais le seul étudiant présent au centre – en fait, je crois, le seul étudiant dans toute l'histoire de l'Institut, alors vieux de deux ans – mais, en vérité, je n'y étais absolument pas pour mes talents en physique. Le cours impétueux de la Roaring Fork River traverse la ville en venant de la ligne de partage des eaux toute proche. L'eau y est tumultueuse, rapide, très froide et, chose la plus importante pour moi cet été-là, pleine d'argent : pas l'argent métallique des mines mais l'argent vivant des truites arc-en-ciel. Mon patron de thèse, Peter, était un pêcheur et, quand il découvrit que je pêchais à la mouche, il m'invita à me joindre à lui l'été à Aspen.

Quand j'étais gosse, mon père m'avait appris à pêcher sur des rivières plus calmes riches en truites, dans l'Est, dans la légendaire Beaverkill River et l'Esopus Creek des Catskill. Là, les plans d'eau étaient tranquilles et l'on pouvait s'immerger jusqu'à la poitrine. Souvent, on pouvait voir non seulement la mouche mais aussi la truite brune passer à l'attaque. Mais en juin, sur la Roaring Fork, un pêcheur sain d'esprit restera sur le bord et essaiera de deviner de son mieux où est la mouche. Il m'a fallu un certain temps pour maîtriser la technique mais j'ai capturé pas mal de truites arc-en-ciel cet été-là – à défaut d'avoir appris quelque chose en physique.

Je n'aime pas trop Aspen aujourd'hui. Le beau monde a remplacé les cow-boys et, à mon avis, ce n'est pas un mieux. Avec les années, j'y suis retourné quelques fois, pas pour la pêche mais pour la physique. J'y suis passé une fois en allant à Boulder, aux alentours de 1990, et je me suis arrêté pour donner une conférence.

À ce moment-là, les trous noirs et l'énigme de l'information perdue commençaient à faire parler d'eux. Le consensus général donnait raison à Hawking mais quelques-uns, en plus de 't Hooft et moi-même, émettaient des doutes. Parmi eux, l'inimitable Sidney Coleman.

Sidney était un personnage haut en couleur, le héros de toute une génération de physiciens. Avec sa moustache, ses yeux tombants et ses cheveux en bataille, il m'a toujours rappelé Einstein. Son esprit était incroyablement leste et légendaire était sa capacité à entrer directement dans le vif du sujet, particulièrement quand il était difficile et plein de subtilités. Sidney était un homme affable mais il n'était pas connu pour supporter volontiers les crétiens. Plus d'un orateur renommé, lors d'un séminaire à Harvard – où Sidney était professeur –, était reparti la queue entre les jambes après qu'il l'avait impitoyablement interrogé. Sa présence à Aspen ce jour-là signifiait que l'orateur de la conférence ferait aussi bien de se tenir à un niveau élevé.

Par pure coïncidence, il y avait un autre visage familier au sein de l'auditoire. Alors que je pénétrais dans le lieu prévu, en plein air, pour la conférence et me dirigeais vers le tableau, une très familière chaise roulante high-tech apparut et Stephen s'installa dans la rangée de devant. Tout le monde savait que mon objectif était de saper les raisonnements de Stephen sur la perte de l'information. J'avais l'intention de commencer par souligner la nature du problème en reprenant la logique des raisonnements de Stephen – ce qui occuperait la moitié de l'heure qui m'était allouée. Je comptais ensuite expliquer en quoi je pensais que cette logique ne pouvait pas être correcte. Mais je voulais aussi ajouter un argument à ceux de Stephen pour les rendre encore plus forts. Le changement de paradigme serait d'autant plus important que la position de Stephen serait forte – si l'on finissait par prouver qu'elle était erronée.

En développant la logique de Stephen, je voulais combler un trou qui avait apparemment échappé à tout le monde. L'idée était la suivante : imaginer que la zone immédiatement à l'extérieur de l'horizon soit remplie de minuscules photocopieuses invisibles. Chaque fois qu'une information, par exemple un document écrit, se dirigerait vers l'horizon, les photocopieuses la reproduiraient : nous aurions deux versions totalement identiques. Une des copies poursuivrait son chemin sans entrave et traverserait l'horizon, pénétrerait dans le trou noir et finirait détruite par la singularité. Le sort de l'autre version est plus compliqué : dans un premier temps, elle serait brouillée, mélangée minutieusement jusqu'à être méconnaissable à moins qu'on ne dispose du code de déchiffrement. Puis elle serait évacuée à l'extérieur avec le rayonnement de Hawking.

Le fait de dupliquer l'information juste avant qu'elle ne franchisse l'horizon semblait résoudre le problème. Commençons par les observateurs qui se tiennent loin du trou noir : ils verraient chaque bit d'information revenir à travers le rayonnement de Hawking et en déduiraient qu'il n'y a aucune raison de modifier les règles de la mécanique quantique. Pour le dire plus crûment, ils concluraient que les idées de Hawking sur la destruction de l'information sont fausses.

Qu'en est-il de l'observateur tombant en chute libre ? Juste après avoir traversé l'horizon, en regardant autour de lui, il ne verrait rien de changé. Ses bits seraient là, toujours avec lui, formant la même personne, accompagnés de ce qui aurait bien pu tomber avec lui. De son point de vue, l'horizon n'est qu'un inoffensif point de non-retour : le principe d'équivalence d'Einstein est parfaitement respecté.

L'horizon d'un trou noir peut-il être réellement recouvert d'outils de reproduction parfaitement fiables, miniatures – peut-être à l'échelle de Planck ? C'est assez tentant. Si c'était possible, cela expliquerait le paradoxe de Stephen d'une façon simple, logique : l'information ne serait jamais perdue dans un trou noir et les physiciens du futur pourraient continuer à utiliser les principes habituels de la mécanique quantique. Les photocopieuses quantiques à l'horizon de chaque trou noir mettraient d'un seul coup un terme à la guerre du trou noir.

Sidney était impressionné. Il se retourna sur sa chaise pour faire face à l'auditoire. Puis, comme seul Sidney pouvait le faire, il expliqua ce que je venais de dire en des termes encore plus clairs que les miens. Stephen ne disait rien. Affaissé dans sa chaise, il arborait un large sourire. Il était clair qu'il savait quelque chose que Sidney ne soupçonnait pas. En fait, tant Stephen que moi-même étions conscients que mon explication n'était qu'une chimère que je n'avais fait surgir que pour mieux la dissiper.

Stephen et moi savions qu'une parfaite photocopieuse d'information quantique aurait contredit les principes de la mécanique quantique. Dans un monde gouverné par les règles établies par Heisenberg et Dirac, une machine à dupliquer parfaite est une impossibilité. J'ai un nom pour cela : le *principe de non-photocopie quantique*. Dans cette partie de la physique moderne appelée théorie de l'information quantique, on dit *principe de non-clonage*.

Je regardai Coleman d'un air triomphant et lançai : « Sidney, les photocopieuses quantiques sont impossibles. » Je m'attendais à ce qu'il saisisse instantanément. Mais, pour une fois, le feu follet fonctionnait au ralenti. J'ai dû expliquer en détail. Les explications que j'ai données à Sidney et aux autres ont couvert le tableau d'équations mathématiques et ont consommé tout le temps imparti qui me restait. En voici une version simplifiée.

Imaginez une machine avec une entrée et deux sorties. N'importe quel système, quel que soit son état quantique, peut être injecté dans l'entrée. Par exemple, on peut charger un électron dans le photocopieur. La machine se saisit de cette entrée et en ressort deux copies identiques. Ces dernières ne sont pas seulement identiques entre elles, elles sont identiques à l'original.

Une photocopieuse quantique



Un électron et sa fonction d'onde en entrée. Deux électrons identiques en sortie.

Si l'on pouvait construire une telle machine, nous disposerions d'un moyen de contourner l'incontournable principe d'incertitude de Heisenberg. Supposez que nous voulions connaître à la fois la position et la vitesse d'un électron. Tout ce que nous aurions à faire serait de le dupliquer et de mesurer la position sur un des clones et la vitesse sur l'autre. Mais c'est évidemment impossible étant donné les principes de la mécanique quantique.

Arrivé à la fin de l'heure, j'avais défendu avec succès le paradoxe de Stephen et expliqué le principe de non-photocopie quantique : il ne me restait plus de temps pour expliquer mon propre point de vue ! Alors que le séminaire touchait à sa fin, la voix mécanique désincarnée de Stephen lança bien fort : « Maintenant, tu es donc d'accord avec moi ! » Il avait les yeux pétillants de malice...

J'avais clairement perdu cette bataille. J'avais été défait par ma propre courtoisie, par le manque de temps et tout particulièrement par la vivacité de Stephen. En quittant Aspen, ce soir-là, je m'arrêtai à Difficult Creek et sortit ma canne à pêche. Mais mon lieu de pêche favori était envahi de gamins bruyants flottant sur des chambres à air...

Troisième partie
Contre-attaque

La bataille de Santa Barbara

Cela se passait un vendredi après-midi de 1993. Tout le monde était rentré chez soi sauf John, Lárus et moi-même qui étions assis dans mon bureau de Stanford, taillant une bavette tout en buvant le café que Lárus avait préparé. Les Islandais font le café le plus fort qui soit. Si l'on en croit Lárus, c'est lié à leur habitude de boire tard le soir.

Lárus Thorlacius, un grand Viking islandais (il affirmait qu'il ne descendait pas des combattants nordiques mais des esclaves irlandais) venait de passer son doctorat à Princeton et était en stage postdoctoral. John Uglum, un Texan républicain (pas du modèle religieux mais du courant libertarien d'Ayn Rand¹) était en troisième cycle avec moi. Au-delà de nos différences culturelles et politiques – je suis un juif libéral du South Bronx –, nous étions bons copains et nous retrouvions souvent entre hommes pour boire un café – parfois quelque chose de plus fort... –, discuter politique et parler des trous noirs. (Quelque temps plus tard, Amanda Peet, une étudiante originaire de Nouvelle-Zélande, est venue ajouter une touche de sororité à notre fratrie.)

En 1993, les trous noirs ne se contentaient plus d'être bien en vue dans le monde des physiciens, ils en étaient le point de mire.

1. Ayn Rand (1905-1982) : écrivain et philosophe américaine d'origine russe, anticommuniste, prônant un capitalisme individuel, s'en prenant à l'altruisme au nom de « l'égoïsme rationnel ». L'ancien président américain conservateur Ronald Reagan se réclamait de ses idées. Elle était proche du courant dit libertarien, caractérisé, entre autres, par la volonté de réduire le plus possible les prérogatives de l'État. « Libertarien » est la traduction la plus courante de l'anglais *libertarian*, lui-même forgé à partir du français « libéraire ». Mais l'absence totale de lien entre les conceptions de ce courant et les idéaux des courants libéraires rendait impossible le retour, dans une traduction française, au mot d'origine. (N.d.T.)

Une des raisons de cet état de fait était l'article écrit à peu près un an et demi auparavant par un groupe de quatre célèbres théoriciens de la physique. Curt Callan, un aristocrate de Princeton, avait été un des chefs de file de la physique des particules en même temps qu'un membre influent de l'establishment scientifique américain depuis les années 1960 – c'est lui qui avait été le patron de thèse de Lárus. Andy Strominger et Steve Giddings, plus jeunes, étaient des étoiles montantes de la University of California, Santa Barbara (UCSB). À l'époque, ce qui me permettait de les distinguer était que Giddings portait des shorts et Strominger des bretelles. Jeff Harvey, de la Chicago University, était (et est toujours) tout à la fois grand physicien, compositeur talentueux (reportez-vous au chapitre 24) et comique. Leur groupe étant connu par leurs initiales CGHS, leur version simplifiée de trou noir était appelée trou noir CGHS. Leur article cosigné avait momentanément créé l'événement, en partie parce qu'ils avaient affirmé avoir enfin résolu le problème de la perte de l'information dans l'évaporation d'un trou noir.

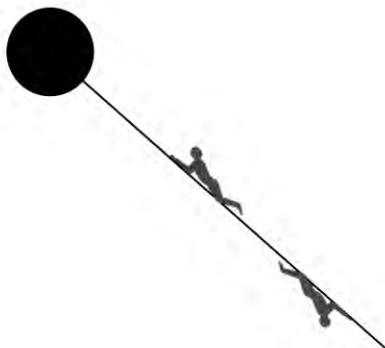
Ce qui rendait la théorie CGHS aussi simple – avec le recul, cette simplicité n'était que trompeuse illusion – était qu'elle se plaçait dans un univers réduit à une dimension spatiale unique : un monde encore plus simple que *Flatland*, l'univers fictif à deux dimensions d'Edwin Abbott¹. Le monde de CGHS était fait de créatures évoluant sur une mince ligne infinie. Ces créatures étaient aussi simples qu'elles pouvaient l'être : rien d'autre que des particules élémentaires. À une extrémité de cet univers unidimensionnel se trouvait un énorme trou noir suffisamment lourd et dense pour piéger tout ce qui s'approchait trop près de lui.

L'article de CGHS était une analyse mathématique extrêmement élégante du rayonnement de Hawking mais qui comportait une erreur : quand il affirmait que la mécanique quantique éliminait la singularité et, avec elle, l'horizon. Lárus et moi-même, ainsi que notre collègue Jorge Russo, étions de ceux qui avaient mis l'erreur en évidence. Cela faisait de nous des experts en trous noirs CGHS. (Il y avait même une version particulière de la théorie CGHS qualifiée de modèle RST – pour Russo, Susskind et Thorlacius.)

1. Voir Edwin A. Abbott, *Flatland, A Romance of Many Dimensions* (1884)*.

* Ce livre a été traduit en français sous le titre *Flatland, une aventure à plusieurs dimensions*. L'édition de 1996 de Denoël est actuellement indisponible. On peut trouver sur Internet le texte original en anglais ainsi qu'une traduction française. (N.d.T.)

Trou noir CGHS



La raison pour laquelle John, Lárus et moi étions assis ensemble après le travail ce vendredi-là était la tenue prochaine d'un colloque spécialement consacré aux mystères et paradoxes des trous noirs. Elle devait avoir lieu deux semaines plus tard à Santa Barbara, au siège de l'Institut de physique théorique – *Institute for Theoretical Physics* (ITP)¹ – à l'UCSB. De quel niveau était cet institut ? En un mot : excellent. Concernant la recherche sur les trous noirs, c'était, en ces années-là, un centre dynamique.

James Hartle était le plus ancien des théoriciens des trous noirs de l'UCSB. Jim était un vétéran de tout premier ordre ayant effectué avec Stephen Hawking des percées révolutionnaires dans le domaine de la gravité quantique, et cela bien avant que le sujet ne devienne à la mode. Il y avait aussi quatre membres plus jeunes du département de physique, tous destinés à jouer de grands rôles dans la guerre du trou noir. Tous avaient autour de trente-cinq ans et étaient extrêmement productifs. Nous avons déjà rencontré Steve Giddings et Andy Strominger (le G et le S de CGHS). Ils comptaient parmi mes amis et j'avais beaucoup d'admiration pour leurs travaux en physique. Mais il n'empêche qu'ils se sont révélés être des adversaires exaspérants au cours des deux années qui ont suivi. Ils m'ont rendu fou en s'accrochant obstinément à des idées insensées. Pour finir, ils ont fait plus que se racheter.

Gary Horowitz était le troisième jeune enseignant de l'UCSB. Gary est un expert en relativité générale – un *relativiste* – qui, dès cette époque, ne devait plus qu'à lui-même sa réputation de brillant

1. L'ITP est devenu aujourd'hui le KITP, pour Kavli Institute for Theoretical Physics.

chef de file dans ce domaine. Il a lui aussi collaboré étroitement avec Hawking et en sait sur les trous noirs autant qu'on puisse en savoir. Enfin, Joe Polchinski venait de quitter l'université du Texas pour Santa Barbara. Joe et moi avons travaillé ensemble sur un certain nombre de dossiers de recherche et je le connaissais assez bien. J'ai toujours trouvé en lui quelqu'un de très agréable, doté d'un authentique sens de l'humour. Mais il m'impressionnait aussi par la puissance et la vivacité de sa pensée : l'intelligence à l'état pur. Depuis les débuts de notre amitié – Joe devait avoir dans les vingt-cinq ans et moi dans les quarante –, j'étais convaincu qu'il deviendrait un des plus grands théoriciens de la physique de notre époque. Je n'ai pas été déçu.

Ces jeunes physiciens extraordinaires travaillaient étroitement ensemble. Quelquefois sur les trous noirs, quelquefois sur la théorie des cordes. Le fabuleux talent de ce petit groupe étroitement soudé lui conférait une très grosse influence en physique théorique et contribuait aussi à faire de Santa Barbara un des endroits les plus prisés (sinon *le* plus prisé) pour un physicien théoricien. Un colloque sur les mystères des trous noirs à Santa Barbara était sans nul doute un événement majeur.

Selon toute vraisemblance, il s'agissait de célébrer l'émoi suscité par l'article de CGHS. On espérait que les techniques mathématiques qu'ils avaient inventées permettraient de résoudre ce qu'on appelait alors *le paradoxe de l'information*. J'avais été sollicité par les organisateurs pour présenter les travaux que Lárus, Jorge et moi-même avons menés à Stanford et nous étions donc restés là tard ce vendredi à discuter de ce que je devrais dire.

Était-ce dû au café très corsé, à une poussée de testostérone ou à une simple retombée de la complicité des trois mousquetaires, toujours est-il que j'ai lancé à Lárus et à John : « Et puis zut ! Je n'ai pas envie de parler de CGHS ou de RST. C'est une impasse¹. Je veux quelque chose qui va vraiment secouer tout ça. Il faut prendre des risques et leur lâcher quelque chose de très osé qui va réellement attirer l'attention. »

Cela faisait un moment que, tous les trois, nous cherchions une issue aux conclusions paradoxales de Stephen. Une idée commen-

1. Rétrospectivement, je crois que la théorie CGHS nous a appris pas mal de choses. Plus que tout ce qui avait été produit auparavant, elle nous a donné une formulation mathématique limpide de la contradiction mise en évidence par Hawking. Elle a sans nul doute eu une grosse influence sur ma propre façon de penser.

çait à prendre consistance. C'était encore assez brumeux – nous n'avions même pas de nom pour cela – mais il était temps de passer à l'action.

« Je crois que nous devrions tous les trois ramasser les bouts épars de notre idée bancale : même si nous ne pouvons pas la prouver, il faut essayer de la préciser. Le simple fait de nommer un concept peut parfois clarifier les choses. Je propose que nous écrivions un article sur la complémentarité du trou noir et je présenterai l'idée nouvelle à la réunion de Santa Barbara. »

L'histoire « *N'oubliez pas de prendre vos pilules antigravitationnelles* » (voir chapitre 13) est un bon point de départ pour expliquer ce que j'avais en tête. Comme le film *Rashomon* d'Akira Kurosawa¹, il s'agit d'une histoire vue à travers les yeux de différents participants – une histoire aboutissant à des conclusions totalement contradictoires. Dans l'une des versions – celle de l'empereur et du comte –, Steve, le physicien persécuté, était annihilé par l'environnement extraordinairement chaud au-dessus de l'horizon. Selon Steve, l'histoire a une fin différente et plus heureuse. À l'évidence, l'une ou l'autre de ces versions, si ce n'est les deux, doit être fausse. Steve ne peut pas à la fois avoir survécu et avoir été tué à l'horizon.

J'expliquai à mes collègues : « Le point essentiel de la complémentarité du trou noir, aussi fou que cela puisse paraître, est que les deux versions *sont vraies*, l'une comme l'autre. »

Mes deux amis étaient perplexes. Je ne me rappelle pas exactement ce que je leur ai dit ensuite, mais ce devait être quelque chose comme : tous ceux qui restent en dehors du trou noir – le comte, l'empereur et ses loyaux sujets – voient la même chose² : Steve a été chauffé, vaporisé et transformé en rayonnement de Hawking. Qui plus est, cela s'est produit juste avant qu'il n'atteigne l'horizon.

Quel sens donner à cela ? La seule voie cohérente avec les lois de la physique serait d'admettre l'existence juste au-dessus de

1. *Rashomon*, sorti en 1950, est le film qui fit connaître en Occident le cinéaste japonais Akira Kurosawa. Il remporta le Lion d'or à la Mostra de Venise en 1951. Dans ce film, adapté d'une nouvelle de Ryunosuke Akutagawa, Kurosawa fait donner d'un même crime quatre versions différentes par quatre acteurs plus ou moins directs du drame. (*N.d.T.*)

2. J'emploie le verbe « voir » dans une acception plutôt générale. Les observateurs se trouvant à l'extérieur du trou noir pourraient détecter l'énergie, et même chaque bit d'information qui formait le corps de Steve, sous forme de radiation de Hawking.

l'horizon d'une couche super-chaude d'une épaisseur peut-être pas plus grande que la longueur de Planck. Je reconnus devant John et Lárus ne pas savoir précisément de quoi elle était faite mais expliquai que l'entropie d'un trou noir se traduisait par le fait que la couche devait être constituée d'objets minuscules, probablement pas plus grands que la longueur de Planck. Cette couche chaude devrait absorber tout ce qui tombait sur l'horizon, exactement comme des gouttes d'encre se dissolvant dans de l'eau. Je me souviens d'avoir désigné ces minuscules objets inconnus du nom d'*atomes d'horizon* – je n'entendais évidemment pas par là des atomes ordinaires. J'en savais sur ces atomes d'horizon autant que les physiciens du XIX^e siècle sur les atomes ordinaires : uniquement qu'ils existent.

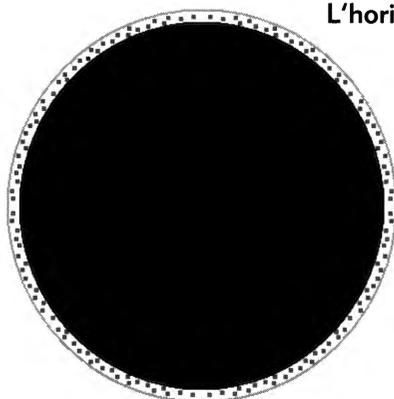
Il fallait un nom à cette couche chaude. Les astrophysiciens avaient déjà forgé le nom que j'ai fini par adopter. Ils avaient utilisé l'idée d'une membrane imaginaire recouvrant le trou noir juste au-dessus de l'horizon afin d'analyser certaines propriétés électriques des trous noirs : les astrophysiciens avaient nommé cette surface *horizon étiré* mais je parlais pour ma part d'une véritable couche de matière située à une longueur de Planck au-dessus de l'horizon et pas d'une surface imaginaire. De plus, j'affirmai que n'importe quelle expérience – comme par exemple descendre un thermomètre et mesurer la température – confirmerait l'existence des atomes d'horizon¹.

Je trouvais que « horizon étiré » sonnait bien et j'ai adopté cette appellation pour mon propre usage. Aujourd'hui, l'horizon étiré est un concept standard de la physique des trous noirs. Il représente une fine couche de microscopiques « degrés de liberté » chauds situés à environ une longueur de Planck de l'horizon.

L'horizon étiré nous aide à comprendre comment un trou noir s'évapore. De temps en temps, un atome d'horizon rapide reçoit un coup un peu plus fort que d'ordinaire et est éjecté de la surface vers l'espace. On peut aussi se représenter l'horizon étiré comme une couche atmosphérique mince et chaude. Cette dernière façon de décrire l'évaporation d'un trou noir est étroitement apparentée à la façon dont l'atmosphère terrestre s'évapore peu à peu dans l'espace. De surcroît, puisqu'un trou noir subit une perte de masse en s'évaporant, il doit aussi rétrécir. Mais ce n'est là que le début

1. Les physiciens savent depuis les années 1970 qu'un thermomètre descendu au voisinage de l'horizon indiquerait une température élevée. Bill Unruh, celui qui a conçu les trous muets, l'avait découvert alors qu'il poursuivait ses études avec John Wheeler.

L'horizon étiré

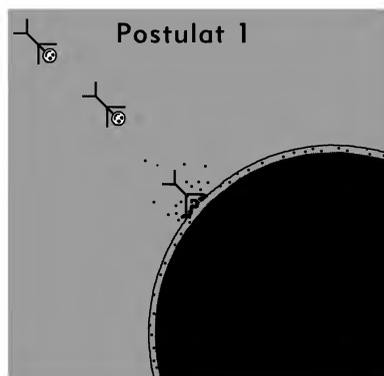


de l'histoire. En lui-même, ce début n'est guère révolutionnaire. De la matière tombe dans une soupe chaude ; celle-ci s'évapore ; des bits d'information sont emportés avec les autres produits de l'évaporation : rien que de très ordinaire. Si je parlais d'autre chose que d'un trou noir, il s'agirait d'une explication tout à fait banale.

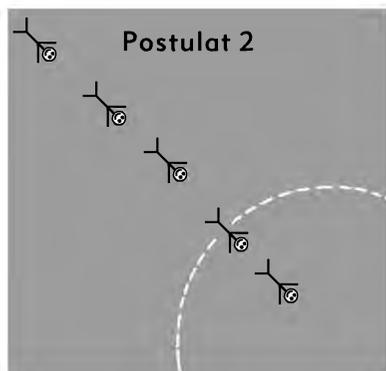
Mais qu'en est-il de ce qu'on voit depuis l'intérieur – plus précisément du spectacle vu par un observateur en chute libre ? Appelons cela la version de Steve, qui peut apparaître comme contradictoire avec le récit fait depuis l'extérieur (la version de l'empereur et du comte).

Je proposai deux postulats.

1. Pour un observateur se situant à l'extérieur d'un trou noir, l'horizon étiré apparaît comme une couche chaude d'atomes d'horizon qui absorbe, mélange et finit par émettre (sous forme de rayonnement de Hawking) chaque bit d'information tombé dans le trou noir.



2. Pour un observateur en chute libre, l'horizon se présente comme un espace totalement vide. Il ne remarque rien de particulier à l'horizon, même si ce dernier constitue un point de non-retour. Il ne se trouvera en présence d'un environnement destructeur que bien plus tard, quand il finira par s'approcher de la singularité.



Il était superflu d'ajouter un troisième postulat, mais je l'ai tout de même fait.

3. Les postulats 1 et 2 sont tous les deux vrais et leur apparente contradiction n'en est pas une.

Lárus était sceptique : comment deux histoires contradictoires pouvaient-elles être vraies en même temps ? Dire d'un seul trait que Steve est tué dans sa chute à l'horizon tout en survivant pendant un million d'années comporte une contradiction logique. La logique élémentaire affirme qu'une chose et son contraire ne peuvent être vrais en même temps. Je me posais bien entendu la même question...

Au deuxième étage du département de physique de Stanford, il y avait eu une présentation d'hologramme : les rayons lumineux renvoyés par un film bidimensionnel dans un agencement aléatoire de minuscules éclats sombres et clairs prenaient forme dans l'espace et présentaient devant vous qui passiez l'image d'une femme jeune et sexy qui vous faisait de l'œil.

Il vous était possible de faire en partie le tour de cette image trompeuse et de l'observer sous divers angles. Lárus, John et moi-même avons pris l'habitude de passer de temps à autre devant l'hologramme. Je me retrouvais donc à railler Lárus sur le fait que



la surface d'un trou noir – l'horizon – devait être un hologramme, un film bidimensionnel de toute la matière tridimensionnelle qui emplissait le trou noir. L'arus n'a pas marché. Moi non plus, d'ailleurs, du moins à ce moment-là. En fait, je n'avais absolument pas perçu la portée de ma propre remarque.

Mais cela faisait un moment que je réfléchissais à tout cela et avais une réponse plus sérieuse. Expérimenter, observer : telles sont les bases de la physique. Quand toutes les images mentales se sont évanouies, il reste des données expérimentales ainsi que des équations mathématiques qui les synthétisent. Une authentique contradiction n'est pas la traduction d'une divergence entre deux représentations mentales. Les limitations de ces dernières nous viennent plus de ce que l'évolution nous a donné en héritage que des réalités que nous tentons de démêler. Une contradiction authentique apparaît seulement lorsque des expériences conduisent à des résultats opposés. Par exemple, si deux thermomètres identiques sont plongés dans un récipient rempli d'eau chaude et indiquent des températures différentes, nous n'acceptons pas les résultats et savons qu'il y a un thermomètre déficient. Les représentations mentales sont précieuses en physique ; mais, si elles paraissent conduire à une contradiction là où il n'y en a pas dans les données, c'est qu'elles ne sont pas adéquates.

Sommes-nous devant une authentique contradiction si nous postulons que les deux histoires sur les trous noirs sont vraies – celle de Steve et celle du comte ? Pour déceler une contradiction, les deux expérimentateurs devraient pouvoir se rencontrer à la fin de l'expérience et comparer leurs relevés. Mais, si une des observations a été faite au-delà de l'horizon alors que l'autre observateur ne l'a pas franchi, de par la définition même de l'horizon, les don-

nées observées n'ont aucune chance d'être confrontées. Il n'y avait donc pas de contradiction réelle mais seulement une mauvaise représentation mentale.

John demanda comment Hawking répondrait. Ma réponse, qui fut pleinement confirmée, fut : « Eh bien Stephen affichera un sourire. »

Complémentarité

Le mot *complémentarité* fut introduit par le père de la mécanique quantique, le légendaire Niels Bohr. Bohr et Einstein étaient bons amis mais se sont constamment opposés à propos des paradoxes et contradictions apparents de la mécanique quantique. En fait, c'est Einstein qui était le véritable père de la mécanique quantique mais il en vint à détester le sujet. Il consacra ses capacités intellectuelles sans pareilles à tenter d'en saper les fondations logiques. Périodiquement, Einstein pensait avoir découvert une contradiction ; périodiquement, Bohr ripostait avec son propre missile : la complémentarité.

Ce n'est pas par hasard que j'ai parlé de *complémentarité* en décrivant la façon dont on pourrait résoudre les paradoxes des trous noirs quantiques. Dans les années 1920, la mécanique quantique était envahie d'apparentes contradictions. L'une d'elles était le débat non tranché à propos de la lumière : onde ou particule ? Son comportement paraissait prendre tantôt une voie, tantôt la voie opposée. Dire qu'elle était à la fois onde et particule était absurde : comment pourrions-nous savoir quand utiliser les équations propres aux particules et quand utiliser celles propres aux ondes ?

Autre mystère : nous nous figurons les particules comme de minuscules objets occupant une position bien précise de l'espace. Mais les particules peuvent se déplacer d'un point à un autre. Pour décrire leur mouvement, nous devons spécifier leur vitesse et la direction de leur mouvement. Presque par définition, une particule possède une position et une vitesse. Eh bien non ! Avec une logique semblant défier la logique, le principe d'incertitude de Heisenberg soutenait qu'on ne peut préciser en même temps position et vitesse : nouvelle aberration...

Il se tramait quelque chose de très étrange. On semblait avoir jeté la raison aux orties... Seulement, bien sûr, il n'y avait pas de

contradiction réelle dans les données expérimentales. Chaque expérience fournissait un résultat bien défini, un relevé sur un cadran, un nombre. Par contre, quelque chose n'allait vraiment pas dans la représentation mentale. La façon dont nos cerveaux avaient été programmés pour appréhender la réalité était incapable de saisir la nature véritable de la lumière ou l'incertitude sur le mouvement des particules.

Ma propre façon d'aborder les paradoxes des trous noirs était la même que celle de Bohr à propos de ceux de la mécanique quantique. En physique, une contradiction n'en est une que si elle conduit à des résultats expérimentaux incohérents. Bohr était aussi très pointilleux sur la précision du langage. Des mots employés à mauvais escient peuvent faire croire à une contradiction là où il n'y en a pas.

La complémentarité porte sur l'emploi erroné d'un tout petit mot de deux lettres : e-t. « La lumière est ondes *et* particules. » « Une particule a une position *et* une vitesse. » Bohr s'insurgeait : libérez-vous de ce *et*, remplacez-le par *ou* : « La lumière est ondes *ou* particules. » « Une particule a une position *ou* une vitesse. »

Ce que Bohr entendait par là était que, dans certaines expériences, la lumière se comportait comme un ensemble de particules tandis que, dans d'autres, elle se comportait comme une onde. Il n'y a aucune expérience où elle se comporte des deux façons en même temps. Si l'on mesure certaines caractéristiques ondulatoires – par exemple la valeur du champ électrique le long de l'onde –, on obtient une réponse. Si l'on mesure une propriété relevant du monde des particules, comme la position des photons dans un rayon de lumière de très faible intensité, on obtiendra aussi une réponse. Mais ne vous essayez pas à mesurer une propriété des ondes en même temps qu'une propriété des particules : une mesure empiétera sur l'autre. On peut mesurer une propriété ondulatoire *ou* une propriété des particules. Bohr disait que ni les ondes ni les particules ne sont des descriptions complètes de la lumière mais qu'elles se *complètent*.

Il en est très exactement de même de la position et de la vitesse. Certaines expériences révèlent la position d'un électron – par exemple un écran de télévision est percuté par un électron en un point précis qui s'illumine. D'autres expériences réagissent à la vitesse – par exemple de quel angle la trajectoire d'un électron est déviée par un aimant. Mais il n'y a aucune expérience qui puisse être sensible à la position *et* à la vitesse de l'électron.

Le microscope de Heisenberg

Oui mais *pourquoi* ne pouvons-nous pas mesurer en même temps la position et la vitesse d'une particule ? En réalité, déterminer la vitesse d'un objet consiste simplement à relever sa position à deux instants successifs et à mesurer la distance parcourue entre les deux. S'il est possible de relever la position d'une particule une fois, on doit bien pouvoir le faire deux fois. Prétendre qu'on ne peut mesurer en même temps position et vitesse paraît receler une contradiction. À première vue, Heisenberg a dit n'importe quoi.

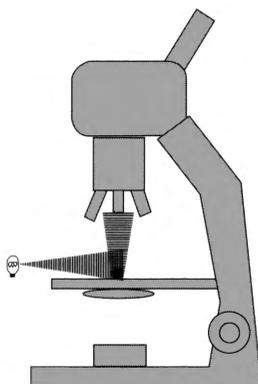
La stratégie de Heisenberg est un exemple brillant du mode de raisonnement qui rend la complémentarité si convaincante. À l'instar d'Einstein, il se fit expérimentateur par la pensée : il se demanda de quelle manière on pourrait finalement s'y prendre pour mesurer à la fois la position *et* la vitesse d'un électron.

Tout d'abord, il se rendit compte qu'il devrait relever la position à deux instants différents pour en déduire la vitesse. Par ailleurs, il lui faudrait effectuer ces relevés sans perturber le mouvement de l'électron, sinon cela pourrait fausser la mesure de la vitesse initiale.

La façon la plus directe de relever la position d'un objet est de le regarder. En d'autres termes, de braquer un rayon lumineux dessus et, grâce à la lumière réfléchiée, déduire sa position. En fait, nos yeux et notre cerveau disposent de tout un appareillage intégré nous permettant de déterminer la position d'un objet à partir de son image rétinienne. Cela fait partie du *hardware*, de toute l'instrumentation dont l'évolution nous a dotés.

Heisenberg a donc imaginé regarder un électron à travers un microscope.

L'idée était d'effleurer l'électron avec un faisceau lumineux – suffisamment doucement pour ne pas lui infliger un coup qui modifie sa vitesse – puis de faire converger le faisceau pour obtenir une image. Mais Heisenberg se trouva piégé par les propriétés de la lumière. Tout d'abord, la dispersion de la lumière par un électron unique relève de la théorie des particules du rayonnement électromagnétique. Heisenberg ne pouvait pas atteindre l'électron plus délicatement qu'à l'aide d'un seul photon. Qui plus est, il faudrait qu'il s'agisse d'un photon très



doux, porteur de très peu d'énergie : la collision avec un photon énergétique engendrerait justement le type de coup bien net qu'il voulait éviter.

Toute image obtenue à partir d'ondes est floue par nature : plus grande est la longueur d'onde, plus floue est l'image. Les ondes radio sont celles qui ont la plus grande longueur d'onde, au-delà de trente centimètres. Elles fournissent d'excellentes images des objets astronomiques mais, si vous essayez de les utiliser pour réaliser un portrait, vous n'obtenez qu'une tache floue.



En descendant l'échelle des longueurs d'onde, celles qui viennent immédiatement après sont les micro-ondes. Un portrait réalisé en focalisant des micro-ondes de dix centimètres serait toujours trop flou pour qu'on puisse en faire quelque chose. Mais, en descendant à deux centimètres, on commence à voir un nez, des yeux, une bouche.



La règle est simple : on ne peut obtenir sur l'image des détails plus petits que la longueur d'onde de la lumière qui l'éclaire. Les éléments d'un visage font quelques centimètres et ils apparaîtront donc quand la longueur d'onde aura cette taille. Si la longueur d'onde est d'un millimètre, un visage apparaîtra bien net, même si un petit bouton peut ne pas apparaître.



Imaginons que Heisenberg ait voulu une image suffisamment nette de l'électron pour pouvoir déterminer sa position avec une précision d'un micron¹. Il lui faut employer une lumière dont la longueur d'onde est inférieure à un micron.

C'est là que le piège se referme. Rappelez-vous ce que nous avons vu au chapitre 4 : plus la longueur d'onde est courte, plus

1. Un micron représente un millionième de mètre. C'est à peu près la taille d'une très petite bactérie.

l'énergie du photon est grande. Par exemple, l'énergie d'un photon de la longueur d'onde d'une onde radio serait si faible qu'elle n'aurait aucun effet sur un atome. À l'opposé, celle d'un photon d'un micron de longueur d'onde serait suffisante pour exciter un atome en envoyant un électron « vers le haut », sur une orbite quantique de plus grande énergie. Un photon ultraviolet, d'une longueur d'onde dix fois plus petite, serait porteur d'une énergie suffisante pour arracher l'électron hors de l'atome. Voilà comment Heisenberg s'est retrouvé piégé. Déterminer la position de l'électron avec une grande précision a un coût : il faut l'atteindre avec un photon très énergétique ; et alors le « coup » porté modifiera son mouvement de façon aléatoire. Mais utiliser un photon très doux, de très faible énergie, ne permettrait d'obtenir rien de plus qu'une très vague idée sur la position de l'électron. Un véritable cercle vicieux.

Vous vous demandez peut-être s'il est *seulement possible* de mesurer la vitesse d'un électron. La réponse est oui. Ce qu'il faut faire est mesurer sa position deux fois, mais avec une précision très faible. Par exemple, on peut utiliser un photon de très grande longueur d'onde et obtenir une image très floue et recommencer beaucoup plus tard. En déterminant deux positions très floues, il est possible de mesurer la vitesse avec précision, mais au prix d'une très faible précision sur la position.

Heisenberg ne pouvait rien concevoir qui lui permette de déterminer au même moment à la fois la position et la vitesse d'un électron. J'imagine que lui-même, ainsi que son mentor Bohr, ont commencé à se demander s'il était raisonnable de supposer qu'un électron possédait à la fois une position et une vitesse. Selon la philosophie de Bohr, on peut décrire un électron comme ayant une position mesurable avec précision grâce à des photons de très courte longueur d'onde *ou* comme ayant une vitesse mesurable grâce à des photons de très grande longueur d'onde, mais pas les deux à la fois. Bohr exprimait cela en disant que les deux types de connaissance – la position et la vitesse – étaient des aspects complémentaires de l'électron. Bien entendu l'électron ne tenait pas une place particulière dans le raisonnement de Heisenberg : cela aurait aussi bien pu être un proton ou un atome qu'une boule de bowling.

L'histoire du comte, de l'empereur et de Steve semble affligée d'une contradiction, mais celle-ci n'est qu'apparente. La recherche

de l'information à l'intérieur de l'horizon et, dans le même temps, la même recherche à l'extérieur s'excluent mutuellement, comme le font les mesures de la position et de la vitesse. Personne ne peut se trouver en même temps hors et au-delà de l'horizon. C'était au minimum ce que je voulais affirmer à Santa Barbara.

Santa Barbara

Les trous noirs existent vraiment. L'univers en est plein et ils font partie des objets astronomiques les plus spectaculaires et les plus violents qui soient. Pourtant, au colloque de Santa Barbara de 1993, la plupart des physiciens ne s'intéressaient pas particulièrement aux trous noirs astronomiques : ce qui constituait le centre d'intérêt était l'expérimentation par la pensée et non les observations faites au télescope. Le paradoxe de l'information avait fini par faire surface de manière visible.

La conférence n'était pas démesurée : une centaine de participants tout au plus. En pénétrant dans l'amphithéâtre, je remarquai de nombreuses têtes connues. Stephen était sur le côté dans sa chaise roulante. Jacob Bekenstein, que je n'avais jamais rencontré, était assis au milieu de l'assistance. Les membres de l'équipe locale – Steve Giddings, Joe Polchinski, Andy Strominger et Gary Horowitz – étaient bien en vue. Ils joueront des rôles majeurs dans la révolution à venir mais, à ce moment-là, ils représentaient l'ennemi, les fantassins désorientés de l'armée des perdants de l'information. Gerard 't Hooft était assis en haut de la rangée de devant, prêt pour la bataille.

L'exposé de Hawking

Voici ce dont je me souviens de l'exposé de Hawking. Stephen était assis, affaissé dans sa chaise roulante, la tête trop lourde pour qu'il puisse la tenir droite, cependant que nous autres attendions dans un profond silence. Il se tenait sur la droite de l'estrade, ce qui lui permettait de voir le grand écran de projection en haut de la salle tout en surveillant l'assistance. Stephen n'était déjà plus capable de parler avec sa propre voix. Une voix électronique délivrait un message préenregistré tandis qu'un

assistant manipulait le projecteur de diapositives depuis le fond. Le projecteur était synchronisé avec le message enregistré. Je me demandais en quoi la présence de Stephen était le moins du monde nécessaire...

Malgré le son robotisé, sa voix révélait une riche personnalité. Son sourire faisait partager une confiance et une assurance extrêmes. Les prestations de Stephen ont quelque chose de mystérieux : comment la présence de ce corps frêle, dont tout mouvement est absent, peut-elle insuffler tant de vie à un événement qui, autrement, serait terne ? Le visage de Stephen, avec ses mouvements tout juste ébauchés, rayonne d'un magnétisme et d'un charisme que peu d'hommes possèdent.

La conférence en elle-même n'avait rien de mémorable, en tout cas pas par son contenu. Stephen dit ce qu'on attendait qu'il dise – ce dont je m'étais refusé à parler : la théorie CGHS et la façon dont ses auteurs l'ont abandonnée (il mit généreusement la découverte de l'erreur au crédit de RST). Son principal message était que, convenablement menées, les mathématiques de CGHS appuyaient sa propre théorie de l'information qui ne peut pas rayonner à l'extérieur d'un trou noir. Pour Stephen, la leçon apportée par CGHS était que les mathématiques de la théorie ne faisaient que prouver son point de vue. À mes yeux, la leçon était que non seulement la représentation mentale était en défaut mais que les fondements mathématiques de la gravité quantique, au moins tels qu'ils se présentaient dans CGHS, étaient incohérents.

Ce qui est le plus déroutant dans les conférences de Stephen est la partie questions-réponses qui suit l'exposé. Un des organisateurs du colloque monte sur la scène et demande si quelqu'un a une question. En général, les demandes portent sur des points techniques et sont parfois interminables et destinées à montrer que celui qui pose la question connaît bien son sujet. Mais après cela, un silence sépulcral tombe sur l'amphithéâtre. Une centaine d'acolytes se transforment en moines ayant fait vœu de silence, assis dans une cathédrale d'où, curieusement, tout bruit a disparu : Stephen assemble sa réponse. La façon dont il communique avec le monde extérieur est stupéfiante. Il est incapable de parler ou de lever la main pour s'exprimer par gestes : ses muscles sont si atrophiés qu'il ne peut tout simplement pas exercer une force quelconque. Il ne dispose pas de la force et de la coordination nécessaires pour utiliser un clavier. Si je me souviens bien, à l'époque il

se servait d'une manette de contrôle sur laquelle il exerçait une faible pression¹.

Un petit écran d'ordinateur est attaché au bras de sa chaise roulante : une série de mots et de lettres défilent à l'écran de façon plus ou moins continue. Stephen les sélectionne un à un et les enregistre sur l'ordinateur afin de former une phrase ou deux. Cela peut prendre jusqu'à dix minutes. Pendant ce temps, alors que l'oracle assemble sa réponse, la salle est aussi silencieuse qu'une crypte. Toutes les conversations s'interrompent pendant que la tension et l'impatience montent. La réponse parvient enfin : cela peut n'être rien de plus que oui ou non, ou encore une phrase ou deux.

J'ai vu cette situation s'installer aussi bien dans une salle où se tenaient une centaine de physiciens que dans un petit stade avec cinq mille spectateurs, y compris un président sud-américain, le chef d'état-major de l'armée et plusieurs généraux. Ma réaction face à ce silence extraordinaire est allée de l'amusement à une vive indignation (pourquoi mon temps est-il ainsi gaspillé par cette farce ?). J'ai toujours envie de faire du bruit, ne serait-ce que parler à mon voisin, mais je ne l'ai jamais fait.

Qu'y a-t-il chez Stephen qui tient son public en haleine comme le ferait un saint homme sur le point de révéler les profonds mystères de Dieu et de l'univers ? Hawking est un homme arrogant, suffisant, très égocentrique. Mais, une fois encore, c'est vrai de la moitié de ceux que je connais, moi compris. Je pense que la réponse tient en partie au côté magique et impénétrable de cette intelligence désincarnée traversant l'univers dans sa chaise roulante. Mais il y a aussi le fait que la physique théorique est un petit monde formé de gens qui se connaissent depuis des années. Pour beaucoup d'entre nous, c'est une extension de notre famille : Stephen en est un membre chéri et profondément respecté, même s'il crée parfois frustration et irritation. Nous sommes tous parfaitement conscients qu'il n'a d'autre moyen de communiquer que le pénible et si lent procédé qu'il utilise. Connaître son opinion est important pour nous et c'est pourquoi nous patientons tranquillement. Je pense aussi qu'il est probable que la concentration de Stephen est si intense pendant qu'il forme sa réponse qu'il ne se rend même pas compte de l'étrange silence qui l'entoure.

1. Aujourd'hui, les choses lui sont encore plus difficiles : la manette de contrôle a été remplacée par un capteur qui détecte d'infimes mouvements de sa joue.

Comme je l'ai dit, il n'y avait rien d'inoubliable dans son exposé. Stephen énonça ses affirmations habituelles : l'information tombe dans un trou noir et n'en ressort jamais. En même temps que le trou noir s'évapore, elle est complètement détruite.

Gerard 't Hooft venait juste après lui. Il possède lui aussi un grand charisme et le monde de la physique a pour lui une immense admiration. Gerard a une présence sur scène extraordinaire et il s'impose par une très grande assurance. Il n'est pas toujours simple à comprendre. Mais rien à voir avec l'aspect oracle plein de mystères de Hawking. C'est un Néerlandais direct et sensé.

Les exposés de Gerard sont toujours drôles. Il aime à faire usage de son corps pour illustrer tel ou tel point et il sait produire des représentations graphiques spectaculaires. Après toutes ces années, je me rappelle très bien la vidéo qu'il avait faite pour illustrer ce qu'est l'horizon d'un trou noir. Une sphère était recouverte de pixels qui étaient noirs ou blancs, au hasard. Pendant que la vidéo se déroulait, les pixels commençaient à basculer de noir à blanc et vice versa. L'image ressemblait aux éclats parasites sur l'écran d'une télé qui ne fonctionne pas bien. Il était à peu près évident que les idées de 't Hooft étaient semblables aux miennes au sujet de l'existence d'une couche active d'atomes d'horizon changeant rapidement et qui constituait l'entropie d'un trou noir. (J'attendais qu'il me vole mon coup de tonnerre et livre sa propre version de la complémentarité du trou noir mais, s'il y avait pensé, il ne l'a absolument pas explicité.)

'T Hooft est un penseur original et très profond. Comme souvent avec les gens très originaux, ses propos n'apparaissent pas clairs pour les autres. À la fin de son exposé sur les trous noirs, il était évident qu'il avait semé l'auditoire. Non pas qu'il l'ait ennuyé – loin de là ! – mais les participants ne pouvaient pas comprendre sa logique. Rappelez-vous : l'horizon d'un trou noir était supposé être l'espace vide, pas un écran de télé défectueux !

Globalement, je ne crois pas que les deux orateurs aient fait changer d'avis qui que ce soit sur le destin de l'information dans un trou noir. Personne n'a fait voter l'assistance mais, à ce stade, je dirais que la tendance était à deux contre un en faveur de Hawking.

Ce que je trouvais remarquable à propos de presque tout le reste du colloque était le refus obstiné de penser à la solution correcte du paradoxe. La plupart des exposés mentionnaient les trois solutions possibles :

1. L'information ressort avec le rayonnement de Hawking.
2. L'information est perdue.
3. L'information finit par se retrouver dans une sorte de minuscule vestige de trou noir qui reste après l'évaporation. (En général, le vestige n'était pas plus gros ni plus lourd que la longueur et la masse de Planck.)

Les exposés, l'un après l'autre, répétèrent ces trois possibilités pour tout de suite éliminer la première. Les orateurs se retrouvaient pour dire : ou bien l'information est perdue, comme Hawking le défend, ou bien de minuscules vestiges se révèlent capables de cacher une quantité arbitrairement grande d'information. Il y a peut-être eu aussi des avocats des bébés-univers, mais je ne me le rappelle plus exactement. Pratiquement personne, en dehors de 't Hooft et deux autres orateurs, ne faisait confiance aux lois usuelles de l'information et de l'entropie.

Don Page fut très près d'affirmer une telle confiance. Page est un gentil ours venant d'Alaska, doté d'un appétit féroce. Bouillant d'énergie, vif, enthousiaste à l'extrême, Don est une contradiction ambulante, en tout cas à mes yeux. C'est un physicien hors pair, un penseur profond. Sa compréhension de la théorie quantique des champs, de celle des probabilités, de l'information, des trous noirs et des fondements généraux de la connaissance scientifique est extrêmement impressionnante. C'est un protestant, du courant du christianisme évangélique. Une fois, il a passé plus d'une heure à m'expliquer, à l'aide d'arguments mathématiques, que la probabilité que Jésus ait été le fils de Dieu dépassait 96 %. Mais sa physique et ses mathématiques sont dénuées de toute idéologie et sont brillantes. Ses travaux ont eu un impact profond non seulement sur ma propre façon de voir les trous noirs mais sur le sujet dans son ensemble.

Dans son exposé, Don répéta le mantra des trois possibilités mais parut moins pressé que les autres à éliminer la première d'entre elles. Mon sentiment était qu'il était vraiment convaincu que les trous noirs se comportent comme les autres objets de la nature, respectant les lois habituelles réclamant que l'information s'échappe pendant l'évaporation. Mais il ne pouvait pas voir lui non plus comment concilier cela avec le principe d'équivalence. Il est remarquable de voir à quel point les physiciens ont alors résisté à la possibilité que l'information s'enfuit avec le rayonnement de Hawking de la même façon qu'elle le fait lors de l'évaporation d'un récipient rempli d'eau.

La complémentarité du trou noir

La guerre du trou noir était parvenue à un pat. Aucun des camps ne paraissait capable de faire un quelconque pas en avant. En fait, le brouillard était si dense sur le champ de bataille qu'il était difficile de distinguer deux camps. En dehors de Hawking et de 't Hooft, mon sentiment était de voir une multitude ahurissante de soldats commotionnés en débandade.

Mon exposé à moi était programmé plus tard le même jour. Je me sentais vraiment comme Sherlock Holmes disant à Watson : « Quand on a éliminé tout ce qui est impossible, ce qui reste, aussi improbable soit-il, doit être vrai. » Quand j'ai fini par prendre la parole, j'avais l'impression que tout avait été éliminé en dehors d'une seule possibilité – quelque chose qui, à première vue, était si improbable qu'elle en paraissait absurde. Malgré tout, ridicule ou pas, la complémentarité du trou noir devait être vraie. Toutes les alternatives étaient impossibles.

« Que vous soyez d'accord avec ce que je dis n'a pas d'importance. Je veux seulement que vous vous rappeliez que je l'ai dit. » Telles furent mes deux premières phrases : quatorze ans plus tard, je les ai toujours en mémoire. Puis, en jargon technique de physicien, j'esquissai les deux résultats contradictoires qui constituent la trame de l'histoire de Steve. « À l'évidence, au moins l'une des deux fins doit être fausse puisqu'elles affirment des choses opposées. » Il y avait de nombreux hochements de tête approuvateurs. Mais je poursuivis : « Néanmoins, je suis venu vous dire l'impossible : aucune des deux histoires n'est fausse : elles sont vraies toutes les deux – de façon complémentaire. »

Après avoir expliqué dans quel sens Bohr avait utilisé le terme de *complémentarité*, j'avançai que, dans le cas d'un trou noir, l'expérimentateur est devant un choix : rester hors du trou noir et relever les données depuis le côté sûr de l'horizon ou bien plonger dans le trou noir et effectuer ses observations depuis l'intérieur. J'insistai : « On ne peut faire les deux à la fois¹. » Imaginez qu'on vienne vous remettre un colis à la maison. Une amie qui passe par

1. J'avais utilisé pour m'exprimer les expressions techniques mathématiques habituelles dont les théoriciens de la physique font usage pour communiquer. Mais je m'en prenais à une représentation mentale issue de connaissances antérieures et pas à une formule mathématique. J'aurais donc tout aussi bien pu faire appel à des images.

là remarque que le livreur n'a pas pu vous remettre le colis et le rapporte donc à sa camionnette. Mais vous – qui êtes dans la maison –, vous répondez au coup de sonnette et, à la porte, récupérez le paquet des mains du livreur. Je pense que vous vous sentiriez fondé à affirmer que les deux récits ne peuvent être vrais en même temps : une personne au moins s'est trompée.

Pourquoi un trou noir serait-il différent ? Je suggèrai de poursuivre l'histoire du colis un peu plus avant. Traduite du jargon technique des symboles mathématiques, la suite de l'histoire donnait à peu près ceci. Le même jour, un peu plus tard, vous sortez de chez vous et retrouvez votre amie dans un café. Elle vous raconte : « Tout à l'heure, je marchais vers chez toi et j'ai vu un livreur venu t'apporter un paquet. Mais personne n'a répondu et il l'a rapporté au camion. – Mais non, tu te trompes ! Il m'a donné le colis. C'était une nouvelle robe que j'avais commandée sur le catalogue. » À l'évidence, on a présenté une contradiction. Les deux observateurs savent que quelque chose est incohérent. En fait, il n'est même pas indispensable que vous quittiez physiquement la maison pour que la contradiction éclate : la même conversation au téléphone conduirait à la même contradiction.

Mais l'horizon d'un trou noir est fondamentalement différent de l'entrée de votre maison. Il faudrait dire que c'est une porte à sens unique : on peut entrer mais pas sortir. D'après la définition même de l'horizon, aucun message ne peut passer de l'intérieur à l'extérieur. L'observateur situé à l'extérieur de l'horizon est coupé en permanence de quiconque ou quoi que ce soit à l'intérieur : pas par un mur épais mais par les lois fondamentales de la physique. La toute dernière étape qui conduit à la contradiction – réunir les deux observations prétendument incohérentes en une seule observation – est une impossibilité physique.

J'aurais voulu ajouter quelques remarques philosophiques à propos de la façon dont l'évolution a façonné une représentation mentale qui nous sert de guide quand il s'agit de grottes, tentes, maisons et portes mais nous induit en erreur dans le cas des trous noirs et de leur horizon. Mais ces remarques auraient été ignorées : les physiciens veulent des faits, des équations, des données, pas de la philosophie et de la psychologie évolutionniste à quatre sous...

Stephen souriait pendant que j'exposais mes vues, mais je ne pense pas qu'il était d'accord.

Je fis ensuite appel à l'analogie des gouttes d'encre tombant dans un récipient rempli d'eau pour illustrer la façon dont l'horizon étiré peut absorber l'information pour, en fin de compte, exactement comme l'eau s'évapore du récipient, être évacuée dans le rayonnement de Hawking. Pour quiconque à l'extérieur du trou noir, il n'y a là rien que de très ordinaire – les trous noirs et les baignoires ne sont pas si différents, en tout cas c'est ce que j'affirmai.

L'auditoire s'agitait : des mains se levèrent timidement pour protester. On savait comment l'information s'échappe d'une baignoire mais, là, quelque chose manquait. Qu'en est-il de quelqu'un qui tombe dans le trou noir ? Quand il parvient à l'horizon étiré, est-il brusquement humidifié ? Cela ne violerait-il pas le principe d'équivalence ?

Je passai donc à la deuxième partie de l'histoire. « Pour quiconque tombe dans le trou noir, l'horizon semble être l'espace vide parfaitement ordinaire. Pas d'horizon étiré, pas d'objets microscopiques à une température incroyablement élevée, pas d'horizon étiré bouillonnant furieusement, rien que de l'ordinaire. J'expliquerai plus tard pourquoi on ne peut déceler aucune contradiction ».

Je ne sais plus très bien si Stephen souriait toujours. Comme je l'ai appris ultérieurement, la plupart des relativistes de l'auditoire ont cru que j'avais perdu la tête.

Mais il était évident que mon exposé avait attiré l'attention. Gerard, qui peut se révéler être d'un caractère sourcilieux, était assis dans la rangée de devant et hochait la tête d'un air renfrogné. Je savais que, de tous les présents, il était celui qui comprenait le mieux ce que je disais. Je savais aussi qu'il m'approuvait mais voulait le dire à sa manière à lui. Ceux dont les réactions m'intéressaient le plus étaient ceux de Santa Barbara – Giddings, Horowitz, Strominger et, tout particulièrement, Polchinski. Depuis l'estrade, je ne pouvais pas m'en faire une idée mais, plus tard, je découvris qu'ils n'avaient absolument pas été ébranlés par mes arguments.

Deux auditeurs s'étaient montrés bien disposés. Après mon exposé, lors du déjeuner à la cafétéria de la faculté, John Preskill et Don Page sont venus s'asseoir près de moi. Le plateau de notre bouillant Don débordait d'une quantité époustouflante de nourri-

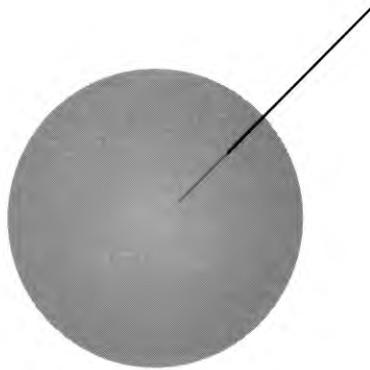
ture, y compris trois desserts géants. (Il n'était pas très difficile de comprendre d'où lui venait son énergie.) Don peut parler fort et avec frénésie, mais il sait aussi être un auditeur très attentif ; ce jour-là, il était sur le mode auditeur. Je savais déjà qu'il appréciait l'idée que les trous noirs soient plus ou moins semblables aux objets ordinaires quand il s'agit de l'information. Il l'avait publiquement dit pendant son exposé tonique.

En comparaison, John Preskill est plus réservé, ce qui ne veut en aucun cas dire qu'il est guindé. Bourru, avec un humour désabusé, John a à peu près le même âge que Joe Polchinski et était, à ce moment-là, professeur au California Institute of Technology. Deux des plus grands physiciens du siècle avaient travaillé à Cal Tech : Murray Gell-Mann et Dick Feynman. John lui-même était un physicien très estimé avec la réputation d'être quelqu'un qui n'hésite pas à aller droit au but. Tout comme Sidney Coleman, John était de ceux à qui la clarté de ses conceptions conférait une autorité morale toute particulière. Les conversations que j'ai eues avec lui ont toujours été enrichissantes. Celle qui eut lieu ce jour-là en est un exemple. Mais avant que je ne puisse vous l'expliquer, il me faut vous en dire un peu plus sur la complémentarité du trou noir.

L'horizon vu au travers du microscope de Heisenberg

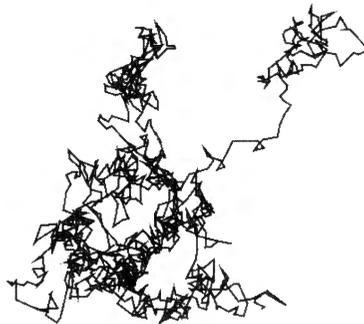
Un simple atome d'hydrogène tombe dans un gigantesque trou noir. Commençons par l'image qui vient naturellement : le minuscule atome poursuit sa trajectoire et dépasse l'horizon, parfaitement intact. En physique classique, cela se produit en un point précis – pas plus grand que l'atome lui-même. Cela sonne juste parce que, selon le principe d'équivalence, il ne devrait rien se passer de violent quand l'atome d'hydrogène dépasse le point de non-retour.

Mais c'est trop simpliste. D'après la complémentarité du trou noir, l'observateur regardant depuis l'extérieur du trou noir voit l'atome pénétrer dans une couche très chaude (l'horizon étiré), exactement comme une particule qui tomberait dans un récipient rempli d'eau chaude. Alors qu'il tombe dans la couche de matière chaude, il est bombardé de tous côtés par des « degrés de liberté » bourrés d'énergie : l'atome est cogné par la gauche, par



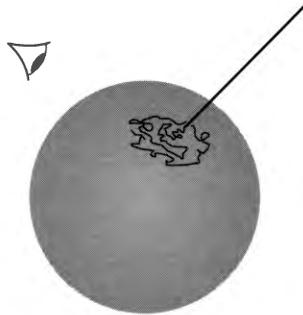
le haut, par la gauche encore, par la droite... Il titube comme un marin ivre. Ce mouvement brownien est appelé à juste titre une *marche aléatoire*.

Mouvement brownien



On peut s'attendre à ce qu'un atome fasse exactement la même chose lorsqu'il tombe dans les degrés de liberté chauds qui constituent l'horizon étiré : tituber sur tout l'horizon.

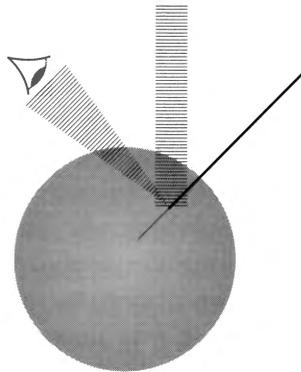
Mais cela reste tout de même trop simpliste. L'horizon étiré est si chaud que l'atome sera brisé en morceaux – le terme technique est *ionisé*. Électron et proton entreprendront leur marche de l'ivrogne séparément sur l'horizon. Même les électrons et les quarks peuvent se retrouver déchiquetés en composants plus élémentaires. Remarquez que tout cela est supposé se produire juste *avant* que l'atome ne croise l'horizon. Je crois que c'est Don qui a explicitement demandé si cela ne posait pas un problème du point de vue de la complémentarité : il semblerait qu'il y ait deux des-



criptions de l'atome, même *avant* qu'il ne passe l'horizon. Dans l'une, l'atome est ionisé pendant qu'il titube sur l'horizon. Mais, dans l'autre, l'atome tombe droit sur un point précis sans que rien ne vienne perturber son mouvement. Pourquoi une observation de l'atome réalisée depuis l'extérieur ne révélerait-elle pas qu'il n'arrive rien de violent à l'atome ? Cela réfuterait la complémentarité du trou noir une fois pour toutes.

Alors que j'entamais mes explications, il devint vite évident que John Preskill s'était posé la même question et en était arrivé à la même conclusion que moi. Nous commençâmes tous deux par remarquer que l'atome ne pourrait pas être ionisé tant qu'il n'aurait pas atteint un point où la température au voisinage de l'horizon serait d'à peu près 100 000 degrés. Cela ne se produit que très près de l'horizon, à environ un millionième de centimètre : c'est là qu'il nous faudrait observer l'électron. Ce qui ne paraît pas trop difficile : un millionième de centimètre, ce n'est pas si petit...

Que ferait Heisenberg ? La réponse est évidente : il sortirait son microscope et éclairerait l'atome avec une lumière de longueur d'onde appropriée – dans notre cas, pour avoir une bonne résolution de l'atome à un millionième de centimètre de l'horizon, il faudrait un photon de 10^{-6} centimètre de longueur d'onde. Et voici que se referme le piège habituel : un photon d'une longueur d'onde aussi petite posséderait une très grande énergie ; en fait, une énergie suffisante pour que le choc avec l'atome *ionise ce dernier* ! En d'autres termes, toute tentative de prouver que l'atome n'est pas ionisé par l'horizon étiré aboutirait à l'ioniser. En allant même plus loin, nous avançâmes que toute tentative de voir si l'électron et le proton entament une marche aléatoire sur l'horizon détruirait les particules et les disperserait au-dessus de l'horizon.



Le souvenir que j'ai de notre discussion est approximatif, mais je me souviens parfaitement que Don s'est beaucoup agité et a lancé de sa voix de stentor que je ne m'étais pas moqué du monde en parlant de complémentarité. C'était très exactement de ce genre de choses que parlaient Bohr et Heisenberg. En réalité, une réfutation expérimentale pour la complémentarité du trou noir était de la même nature que pour le principe d'incertitude : c'est l'expérience elle-même qui créerait le genre d'incertitude qu'elle était censée réfuter.

Nous discutâmes de ce qui arriverait à un atome s'approchant un peu plus de l'horizon. Le microscope de Heisenberg devrait utiliser des quanta d'énergie encore plus grands. En fin de compte, pour suivre notre atome à une distance de l'horizon inférieure à la longueur de Planck, il nous faudrait l'atteindre avec des photons dotés d'une énergie encore plus grande que celle de Planck. Personne n'a idée de ce que de telles collisions pourraient donner. Aucun accélérateur de par le monde n'a seulement permis à une particule de s'approcher de l'énergie de Planck. John en a fait un principe :

Toute preuve théorique que la complémentarité du trou noir conduit à une contradiction observable dépendra fatalement d'affirmations invérifiées sur « la physique au-delà de l'échelle de Planck » – en d'autres termes d'affirmations sur la nature dans un domaine se trouvant bien au-delà de notre expérience.

Preskill mit sur le tapis une question qui me contraria. Supposons qu'un bit d'information tombe dans un trou noir. Selon ma façon de voir, un observateur extérieur pourrait recueillir le rayonnement de Hawking et finir par retrouver ce bit. Mais imaginons

maintenant qu'une fois cela fait il saute dans le trou noir en emportant le bit : y aurait-il deux exemplaires du bit à l'intérieur de ce dernier ? Ce serait comme si, après avoir reçu votre colis des mains du livreur, vous restiez à la maison et que votre amie y entre : une contradiction n'apparaîtrait-elle pas si les deux témoins se rencontraient à l'intérieur de la maison et comparaient leurs observations ?

La question de John me perturba : je n'y avais jamais pensé. Si quelqu'un, à l'intérieur, découvrirait deux exemplaires du même bit, ce serait une violation du principe de non-photocopie quantique. C'était là le défi le plus sérieux à la complémentarité du trou noir que j'avais rencontré. Même si j'ai mis plusieurs semaines à le comprendre, c'est Preskill qui avait en partie fourni lui-même la réponse. Il s'était dit qu'il est peut-être impossible que les deux exemplaires se rencontrent avant de s'effondrer sur la singularité. La physique de ce qui se produit au voisinage de la singularité est profondément enfoncée dans cette mystérieuse *terra incognita* qu'est la gravité quantique. Ce qui nous offrait la possibilité de nous tirer de ce borbier. Comme prévu, les idées de Don Page jouèrent aussi un rôle essentiel pour désamorcer la bombe placée par Preskill.

La discussion s'interrompt brutalement quand on annonça que l'exposé suivant était sur le point de commencer. Je crois que ce fut le dernier exposé du colloque, mais je n'ai aucune idée ni de qui l'a fait ni de ce sur quoi il portait. J'étais trop absorbé par la question de Preskill pour me concentrer. Mais, avant la clôture du colloque, je fus arraché à mes pensées par l'annonce faite par un des organisateurs : Joe Polchinski se leva et demanda qu'on procède à une consultation. La question était celle-ci : « Pensez-vous que l'information est perdue lors de l'évaporation d'un trou noir comme le maintient Hawking ou pensez-vous qu'elle en ressort comme l'affirment 't Hooft et Susskind ? » Je pense que les votes, s'ils avaient eu lieu avant le colloque, auraient penché largement du côté des vues de Hawking. J'étais extrêmement curieux de voir si l'opinion du public du colloque avait été un tant soit peu infléchie.

On a demandé aux participants de voter pour l'une des trois possibilités habituelles plus une quatrième. Voici les éléments du choix, paraphrasés :

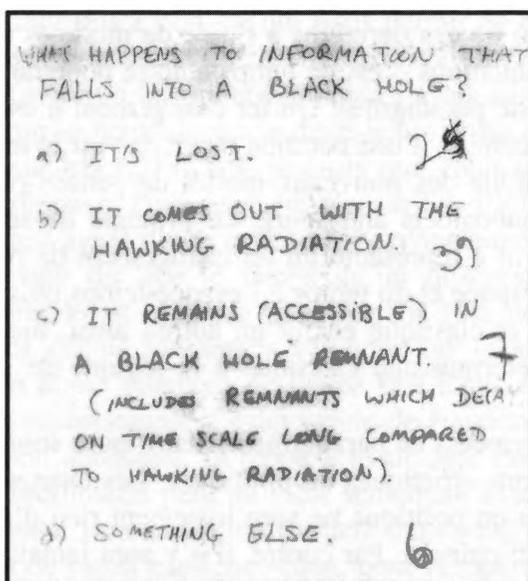
1. Option Hawking : l'information qui tombe dans un trou noir est irrémédiablement perdue.

2. Option 't Hooft et Susskind : l'information ressort en suintant au sein des photons et autres particules du rayonnement de Hawking.

3. L'information est enfermée dans de minuscules vestiges à l'échelle de Planck.

4. Autre chose.

Joe enregistra chacun des votes à main levée sur le tableau blanc qui était devant l'amphithéâtre. Quelqu'un a photographié le tableau pour la postérité. Le voici, avec l'aimable autorisation de Joe.



Les résultats furent :

- 25 voix pour la perte de l'information ;
- 39 voix pour le fait que l'information ressort avec le rayonnement de Hawking ;
- 7 voix pour les vestiges ;
- 6 voix pour autre chose.

39 voix pour ce qui était en fait le principe de complémentarité du trou noir contre 38 pour toutes les autres possibilités réunies : cette victoire momentanée n'était pas aussi satisfaisante qu'il peut paraître. Que serait une véritable victoire : 45 contre 32 ? 60 contre 17 ? Ce que pense une majorité compte-t-il vraiment ? La science,

contrairement à la politique, n'est pas supposée être régie par l'opinion populaire !

Peu avant la conférence de Santa Barbara, j'avais lu le livre de Thomas Kuhn, *La Structure des révolutions scientifiques*¹. Comme la plupart des physiciens, je ne m'intéresse en général pas à l'opinion des philosophes sur la façon dont se fait la science mais je trouve que les idées de Kuhn vont droit au but. J'y ai trouvé clairement exprimé ce que je pensais confusément de la façon dont la physique a avancé dans le passé et, plus important ici, dont j'espérais la voir progresser en 1993. L'opinion de Kuhn était que le progrès ordinaire de la science – la récolte de données expérimentales, l'interprétation de ces dernières à l'aide de modèles théoriques, la résolution d'équations – est de temps à autre ponctué d'importants changements de paradigmes. Un tel changement n'est rien d'autre que le remplacement d'une certaine façon de voir le monde par une autre. L'ensemble des nouveaux modes de pensée prend la place des cadres conceptuels antérieurs. Le principe de sélection naturelle de Darwin a représenté un tel changement de paradigme ; le passage de l'espace et du temps à l'espace-temps puis à un espace-temps souple et élastique en fut un autre ; ainsi, bien sûr, que le passage du déterminisme classique à la logique de la mécanique quantique.

Les changements de paradigmes scientifiques sont différents de leurs équivalents artistiques ou politiques. Les changements d'opinion en art ou en politique ne sont justement rien d'autre que des changements d'opinion. Par contre, il n'y aura jamais un retour de balancier nous ramenant des lois sur le mouvement de Newton à la mécanique d'Aristote. Notre conviction que les lois de la gravitation d'Einstein sont supérieures à celle de Newton a peu de chances d'être infirmée dès lors qu'il s'agit de faire des prévisions précises sur le système solaire. Le progrès dans les sciences – la progression dans les paradigmes – est réel.

Bien entendu, la science relève de l'humain et, pendant le difficile combat pour que s'imposent de nouveaux paradigmes, il se peut qu'opinions et émotions s'y révèlent versatiles, comme dans toute autre entreprise humaine. Mais, d'une manière ou d'une autre, la démarche scientifique permet de faire retomber les pas-

1. La traduction française de Laure Meyer est éditée par Flammarion dans la collection Champs. (N.d.T.)

sions : alors de petits noyaux de vérité demeurent. On peut y apporter des améliorations mais, tant qu'ils fonctionnent, on ne revient pas en arrière.

Je pense que la guerre du trou noir a été une bataille classique pour un nouveau paradigme. Le fait que la complémentarité du trou noir avait emporté la majorité des suffrages lors d'une consultation ne prouvait rien. En fait, ceux que je voulais le plus influencer – Joe Polchinski, Gary Horowitz, Andy Strominger et, par-dessus tout, Stephen – avaient voté contre.

Durant les semaines qui ont suivi, Lárus Thorlacius et moi-même avons tout mis à plat, ce qui nous permit de comprendre la réponse à la question de John Preskill. Cela nous a pris un moment mais je suis sûr que, si la conversation que j'avais eue avec Preskill et Page avait pu se poursuivre une demi-heure, nous aurions résolu le problème sur place. En fait, je crois que John avait fourni la moitié de la réponse. Pour faire simple, un bit d'information met un certain temps avant d'être évacué par rayonnement hors du trou noir. John s'était dit que le temps qu'un observateur extérieur puisse récupérer le bit et sauter avec dans le trou noir, le bit original se serait depuis longtemps effondré sur la singularité. La seule question était : combien de temps faut-il pour récupérer un bit au sein du rayonnement d'évaporation de Hawking ?

D'une façon amusante, la réponse avait déjà été fournie dans un article extraordinaire paru un mois seulement avant le colloque de Santa Barbara. Le contenu de l'article impliquait – même si ce n'était pas dit de façon explicite – que, pour récupérer ne serait-ce qu'un simple bit d'information, il faudrait attendre que la moitié des photons de Hawking ait été évacuée dans le rayonnement. Étant donné le rythme très lent auquel les trous noirs rayonnent des photons, il faudrait 10^{68} ans – une durée bien plus longue que l'âge de l'univers – pour évacuer la moitié des photons d'un trou noir d'une masse stellaire. Mais il ne faudrait qu'une fraction de seconde pour que l'original soit annihilé par la singularité. Il était évident qu'il n'y avait aucun moyen de récupérer le bit dans le rayonnement de Hawking, de sauter avec et de le comparer avec le premier exemplaire. La complémentarité du trou noir était sauvée. L'auteur de ce brillant article ? Don Page...

Marche arrière, toute !

Dans les années 1960, je suis allé voir une pièce dans un petit théâtre d'avant-garde de Greenwich Village. Un temps fort – qui s'avéra relever de la farce – nécessitait la participation des spectateurs entre les actes pour remplacer l'équipe du théâtre et déplacer les décors.

Une dame, à qui on avait demandé de déplacer une chaise à l'arrière du théâtre, la vit s'effriter en un monceau de petit bois sitôt qu'elle la toucha... Un autre devait empoigner une petite valise qui refusait de bouger. La tâche qui m'était dévolue était de soulever un rocher de deux mètres et de le tendre à quelqu'un situé dans un balcon bas. Pour vous mettre dans l'ambiance, je l'ai entouré de mes bras, prêt à bander toutes mes forces pour le soulever. Ce fut un grand moment de dissonance cognitive¹ : tous mes sens furent bernés et le rocher bondit en l'air aussi facilement que s'il pesait quelques grammes : ce n'était qu'une mince coquille creuse en balsa peint.

Le lien que fait notre cerveau entre la taille d'un objet et son poids est peut-être un de ces instincts préprogrammés – une partie de ce que nous gnoquons automatiquement en physique. Une conséquence en est qu'une appréhension erronée dans ce domaine traduirait probablement de graves dommages cérébraux – à moins qu'il ne s'agisse de quelqu'un qui se trouve être spécialisé en physique quantique...

1. *Cognitive dissonance* : « dissonance cognitive » est la traduction consacrée de ce qui a été à la base de la théorie du même nom, élaborée à la fin des années 1950 par le psychologue américain Festinger qui la définissait comme « un état de tension désagréable dû à la présence simultanée de deux cognitions (idées, opinions, comportements) psychologiquement inconsistante ». (*N.d.T.*)

Les découvertes d'Einstein de 1905 ont ouvert bien des chantiers de reprogrammation, l'un des plus gros consistant à se défaire du précepte : *Ce qui est grand est lourd, ce qui est petit est léger* pour le remplacer par son exact inverse : *Ce qui est grand est léger, ce qui est petit est lourd*. Comme souvent, c'est Einstein qui, le premier, pressentit cette inversion de la logique du genre de celle d'Alice au pays des merveilles. Que fumait-il à l'époque ? Rien d'autre que sa pipe, selon toute vraisemblance. Et, comme toujours, il tirait ses conclusions les plus pénétrantes des expériences les plus simples qu'il menait dans son imagination.

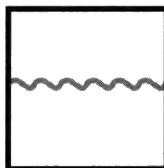
La boîte à photons qui devenait incroyablement petite

Cette expérience de pensée commence avec une boîte entièrement vide, à l'exception de quelques photons, et qu'on peut agrandir ou rapetisser à volonté. Ses parois intérieures sont des miroirs parfaits, ce qui fait qu'un photon piégé dedans rebondit un peu partout sur ces surfaces réfléchissantes sans pouvoir s'échapper.

Une onde confinée dans une portion fermée de l'espace ne peut avoir une longueur d'onde plus grande que les dimensions de sa geôle. Essayez donc d'en représenter une de dix mètres de longueur d'onde dans une boîte d'un mètre de côté !



Cela n'a aucun sens ! Par contre, si elle a un centimètre de longueur d'onde, elle y rentrera facilement.



Einstein imagina que la boîte devenait de plus en plus petite, les photons restant toujours enfermés dedans. La longueur d'onde

des photons ne peut rester la même pendant que la boîte rétrécit : la seule possibilité est que celle de chacun des photons s'amenuise en même temps que la boîte. En fin de compte, la boîte deviendra microscopique et sera remplie de photons de très grande énergie – grande parce que leur longueur d'onde est très courte. Continuer à réduire la boîte accroîtra encore l'énergie.

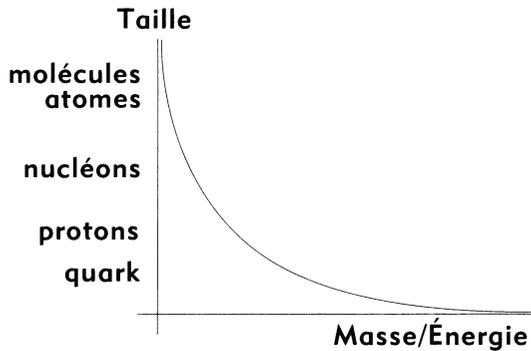
Mais rappelez-vous la fameuse équation d'Einstein : $E = mc^2$. Si l'énergie contenue dans la boîte grandit, il en est de même de la masse de cette dernière. Ainsi, plus la boîte devient *petite*, plus sa masse *s'accroît*. Une nouvelle fois, notre intuition se retrouve cul par-dessus tête et les physiciens doivent réapprendre les règles : ce qui est petit est lourd, ce qui est grand est léger.

La relation entre taille et masse se révèle d'une autre façon. La nature semble être bâtie de façon hiérarchique, chaque niveau de structure comprenant des objets de plus petite taille. C'est ainsi que les molécules sont faites d'atomes ; les atomes d'électrons, de protons et de neutrons ; les protons et les neutrons de quarks. Ces empilements de structures ont été découverts par les scientifiques en provoquant des collisions entre des atomes cibles et des particules, et en regardant ce qui en ressortait. D'une certaine façon, ce n'est pas très différent de l'observation ordinaire où l'on fait rebondir de la lumière (des photons) sur des objets avant de la faire converger sur une pellicule photo ou la rétine de l'œil. Mais, comme nous l'avons vu, pour sonder à très petite échelle, nous avons besoin de photons (ou d'autres particules) de très grande énergie. Il est évident que, pendant qu'un photon possédant une très grande énergie explore un atome, une grande quantité de masse – grande selon les normes des particules élémentaires de la physique – doit se retrouver concentrée en un lieu de petites dimensions.

Une représentation graphique nous montrera les relations réciproques entre taille d'une part, masse/énergie de l'autre. Sur l'axe vertical, nous placerons la taille des objets que nous essayons de sonder. Sur l'axe horizontal, nous mettrons la masse/énergie du photon nécessaire pour pouvoir distinguer l'objet.

La tendance est claire : plus l'objet est petit, plus grande est la masse/énergie nécessaire pour le distinguer. Pendant presque tout le xx^e siècle, tout étudiant en physique a dû se reprogrammer pour intégrer cette relation inverse entre taille et masse/énergie.

La boîte à photons d'Einstein n'était pas une anomalie. L'idée que plus petit signifie plus massif imprègne la physique moderne

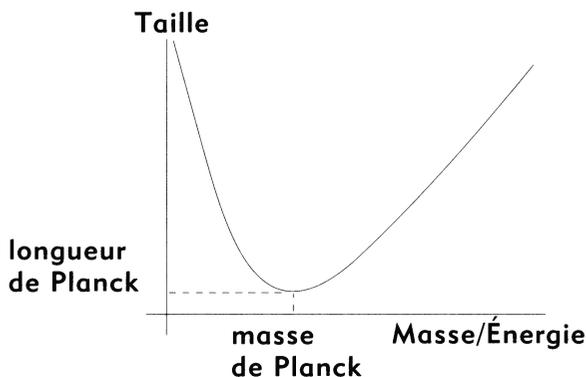


des particules élémentaires. Mais, comble d'ironie, le xxi^e siècle s'annonce comme devant annuler cette reprogrammation...

Pour comprendre pourquoi, imaginons que nous voulions déterminer ce qu'il y a – pour autant qu'il y ait quelque chose – à une échelle un million de fois plus petite que la longueur de Planck : peut-être la structure hiérarchisée de la nature se poursuit-elle aussi loin. La stratégie standard du xx^e siècle aurait été de sonder quelque cible avec un photon possédant une énergie un million de fois plus grande que celle de Planck. Mais cela se retournerait contre nous.

Pourquoi ? Nous ne serons probablement jamais capables d'accélérer des particules jusqu'à l'énergie de Planck, encore moins jusqu'à un million de fois plus. Mais nous savons déjà ce qui se produirait si nous en étions capables : lorsque pareille masse se trouve fourrée dans un espace minuscule, il se forme un trou noir. L'horizon du trou noir nous tiendra en échec en cachant tout ce que nous pourrions tenter de détecter à l'intérieur. Si nous essayons de voir à des distances de plus en plus petites en augmentant l'énergie des photons, c'est l'horizon lui-même qui deviendra de plus en plus grand et nous cachera toujours plus de choses : encore un cercle vicieux.

Que ressort-il de la collision ? Le rayonnement de Hawking et rien d'autre. Mais quand le trou noir grossit, la longueur d'onde du rayonnement de Hawking grandit. L'image précise de minuscules objets en dessous de l'échelle de Planck est remplacée par une image de plus en plus floue réalisée par des photons de grande longueur d'onde. Ce qu'on peut donc espérer de mieux, avec une énergie de collision croissante, est seulement de redécouvrir la nature sur une grande échelle. Voilà pourquoi le graphique taille-énergie ressemble plutôt à ceci :



La connexion infrarouge-ultraviolette

Le minimum est atteint à peu près à l'échelle de Planck – nous ne pouvons rien déceler de plus petit – et, au-delà, la nouvelle programmation est la même que celle de l'ère préindustrielle : grand = lourd. Ainsi, la marche en avant du réductionnisme – cette idée que chaque chose est faite de choses plus petites – s'arrête obligatoirement à l'échelle de Planck.

Les expressions *ultraviolet (UV)* et *infrarouge (IR)* ont acquis un sens en physique qui va bien au-delà de leurs conséquences initiales, qui avaient toutes trait aux ondes lumineuses de petite ou grande longueur d'onde. Du fait de la relation du xx^e siècle entre taille et énergie, les physiciens emploient souvent ces expressions pour parler de grandes (UV) et basses (IR) énergies. Mais la nouvelle programmation mélange tout : au-delà de la masse de Planck, une énergie plus grande signifie une plus grande taille, une énergie plus petite, une plus petite taille. La confusion se reflète dans la terminologie : la nouvelle mode qui met sur le même plan grande taille et grande énergie s'est fait connaître par l'expression obscure *connexion infrarouge-ultraviolette*¹.

C'est en partie le manque de compréhension de la connexion infrarouge-ultraviolette qui a induit en erreur les physiciens sur la nature de l'information tombant sur l'horizon. Au chapitre 15, nous nous étions imaginés en train de regarder à travers le microscope de Heisenberg un atome tombant vers le trou noir. À mesure que le

1. Je suis entièrement responsable de cette terminologie abominable. L'expression *connexion infrarouge-ultraviolette* a été utilisée pour la première fois dans un article de 1998 que j'ai écrit avec Edward Witten.

temps passe et que l'atome se rapproche de l'horizon, il faut des photons possédant de plus en plus d'énergie pour distinguer l'atome. En fin de compte, l'énergie sera si importante que la collision entre le photon et l'atome créera un grand trou noir. L'image devra donc être récupérée dans le rayonnement de Hawking de grande longueur d'onde : au lieu d'obtenir une image précise de l'atome, on obtiendra une image de plus en plus floue au point que celui-ci semblera occuper la totalité de l'horizon. Vu de l'extérieur, il ressemblera – en utilisant une analogie désormais familière – à une goutte d'encre se dissolvant dans un récipient d'eau chaude.

La complémentarité du trou noir, pour choquante qu'elle paraisse, semble au moins cohérente. En 1994, j'avais envie de secouer Hawking et de lui dire : « Regarde un peu, Stephen, tu es en train de rater l'essentiel de ton propre travail ! » J'essayai bientôt, mais sans succès. Cette tentative, qui s'étendit sur un bon mois, eut son lot de comique comme de pathétique... Laissons donc la physique de côté le temps que je vous raconte ce que furent mes frustrations d'alors.

Achab à Cambridge



Un minuscule point blanc a grossi jusqu'à occuper tout mon champ de vision. Mais, contrairement à l'obsession d'Achab¹, la mienne n'était pas un cachalot de cent tonnes : elle était due à un physicien théoricien de cinquante kilos assis dans une chaise roulante motorisée. Mes pensées s'écartaient rarement de Stephen Hawking et de ses idées erronées à propos de la destruction de l'information à l'intérieur d'un trou noir. Je n'avais plus aucun doute sur ce qui était vrai mais j'étais miné par la nécessité d'en convaincre Stephen. Je n'avais nulle envie de le harponner, encore moins de l'humilier : je ne voulais que lui faire partager mes vues. Je voulais qu'il comprenne les implications profondes de son propre paradoxe.

Ce qui me dérangeait le plus était la facilité avec laquelle de si nombreux experts – au fond tous, en tout cas presque tous, des spé-

1. Achab est le capitaine du baleinier qui poursuit, à travers les mers du monde, le cachalot Moby Dick dans le roman éponyme de Herman Melville. (N.d.T.)

cialistes de la relativité générale, des relativistes – acceptaient les conclusions de Stephen. J’avais du mal à comprendre comment lui et les autres pouvaient être si suffisants. Stephen affirmait qu’il y avait un paradoxe qui présageait une révolution – ce qui était juste. Mais pourquoi lui et les autres faisaient-ils comme si de rien n’était ?

Mais il y avait pire : ce que je ressentais était que Hawking et les relativistes se débarrassaient joyeusement d’un des piliers de la science sans chercher à le remplacer. Stephen avait échoué dans sa tentative d’introduire la matrice-dollar¹ – quand on en tirait toutes les conséquences, cela conduisait à des violations désastreuses de la conservation de l’énergie –, mais tous ses partisans étaient satisfaits de dire : « Eh bien d’accord, l’information est perdue dans l’évaporation d’un trou noir » et en restaient là. J’étais agacé de ce qui n’était à mes yeux que paresse intellectuelle, renoncement à la curiosité scientifique.

Le seul soulagement à mon obsession était de courir, parfois sur plus de vingt kilomètres, à travers les collines derrière Palo Alto. Poursuivre qui se trouvait quelques mètres devant moi m’aidait le plus souvent à clarifier mes idées jusqu’à ce que je le, ou la, dépasse. Alors, c’est Stephen qui m’apparaissait devant...

Il avait envahi mes rêves. Une nuit, au Texas, je rêvai que Stephen et moi-même étions tous les deux entassés dans une chaise roulante. Je luttais pour le repousser de toutes mes forces. Mais Stephen-Hulk² était incroyablement fort. Il m’empoigna par le cou, m’étranglant à me faire perdre le souffle. Nous lutâmes jusqu’à ce que je me réveille, en sueur.

Le remède ? Comme Achab, il me faudrait aller à l’ennemi et le pourchasser là où il se terrait. C’est ainsi qu’au début de 1994 j’acceptai une invitation à visiter le flamboyant neuf Newton Institute de l’université de Cambridge. En juin, Stephen devait tenir sa cour au sein d’un groupe de physiciens que, pour la plupart, je connaissais bien mais ne comptais pas parmi mes alliés : Gary Horowitz, Gary Gibbons, Andy Strominger, Jeff Harvey, Steve Giddings, Roger Penrose, Shing-Tung Yau et quelques autres poids lourds. Mon unique allié, Gerard ’t Hooft, n’y serait pas.

1. Voir chapitre 11. (*N.d.T.*)

2. Hulk est un personnage de bande dessinée – créé par Stan Lee en 1962 –, monstre d’une force extraordinaire et incontrôlable. (*N.d.T.*)

étaient assis au niveau inférieur, habillés de leurs toges. Le corps des enseignants en science prit place à la Haute Table, dressée sur une estrade surélevée à une extrémité du hall. Les serveurs qui officiaient pour le repas étaient de loin mieux habillés que je ne l'étais et j'étais flanqué de chaque côté de professeurs qui marmonnaient dans une langue que je comprenais à peine. À ma gauche, un ancien professeur d'université ne tarda pas à ronfler dans sa soupe. À ma droite, un enseignant distingué était en train de raconter une histoire à propos d'un invité américain qui avait été là quelque temps auparavant. Il apparaissait que cet Américain, à qui faisait défaut la sophistication attendue d'un homme de Cambridge, avait fait un choix de vin ridiculement inapproprié...

Aujourd'hui, mes compétences en œnologie sont telles que je suis raisonnablement sûr de distinguer les yeux fermés un vin rouge d'un blanc. Je suis encore plus sûr de moi pour faire la différence entre vin et bière. Au-delà, mon palais me joue des tours... Je ne saurais même pas dire si j'étais la cible de l'histoire. Le reste de la conversation porta uniquement sur des sujets propres à Cambridge et me passa au-dessus de la tête. On m'abandonna à mon repas sans goût – du poisson bouilli recouvert d'une pâte de farine blanche –, complètement à l'écart de toute discussion.

Un autre jour, mon hôte m'emmena me promener aux alentours de Trinity College. Une vaste pelouse très bien entretenue occupait la place d'honneur devant l'entrée principale d'un des bâtiments. Je remarquai que personne ne marchait sur la pelouse : une promenade la contournait, seul chemin autorisé. Je fus donc surpris quand le professeur Polkinghorne me prit par le bras pour nous la faire traverser droit devant nous, en suivant une oblique. Quel sens cela avait-il ? Était-ce une violation d'un espace sacré ? La réponse était simple : les professeurs – qui sont bien moins nombreux dans les universités britanniques que dans leurs homologues américaines –, disposaient du privilège ancien de marcher sur la pelouse. Personne d'autre, en tout cas d'un rang inférieur, n'avait le droit de la fouler.

Le lendemain, je quittai le College sans escorte pour me raccompagner à mon hôtel. À trente et un ans, j'étais sans doute jeune pour être professeur, mais j'en étais un. J'en déduisis naturellement que cela me conférait le droit de traverser la pelouse. Je n'avais pas effectué la moitié du chemin qu'un petit monsieur boudiné, vêtu d'un semblant de smoking et coiffé d'un chapeau melon, bondit hors d'un des bâtiments et me demanda d'un air irrité de sortir

immédiatement de la pelouse. J'eus beau protester que j'étais un professeur américain, rien n'y fit.

Vingt-trois ans plus tard – barbu, plus vieux, sans doute d'apparence un peu plus intimidante –, je tentai à nouveau l'aventure. Cette fois, je fis ma traversée sans encombre. Cambridge avait-elle changé ? Je n'en sais vraiment rien... Avais-je, moi, changé ? Ça oui ! Ce qui, deux décennies plus tôt, m'avait choqué comme étant du snobisme de classe – la Haute Table, le privilège spécial de la pelouse –, ne me paraissait être rien de plus que le signe d'une exquise hospitalité avec, peut-être, une pointe d'excentricité toute britannique. Mon retour à Cambridge me surprit par de nombreux aspects. Outre le fait que mon aversion des particularismes universitaires s'était transformée en quelque chose tenant bien plus de l'amusement, la cuisine britannique, célèbre pour son abomination, avait décidément fait des progrès. En fait, j'ai vraiment aimé Cambridge !

Le premier jour, je me suis levé très tôt. Je voulais me promener ici et là en rejoignant ma destination finale, le Newton Institute. Je laissai mon épouse, Anne, dans notre appartement de Chersteron Road. Je marchai au-delà de la rivière Cam, dépassai les hangars où sont entreposés les bateaux qui servent aux compétitions d'aviron et traversai Jesus Green. (Lors de mon premier séjour, j'avais été intrigué, irrité même, par le fait que tant de traditions culturelles de Cambridge plongent leurs racines dans la religion.)

Je rejoignis Bridge Street et traversai la rivière Cam. Cam ? Bridge ? Cambridge¹ ? Se pourrait-il que je me trouve à l'endroit du pont originel, celui qui a donné son nom à la célèbre université ? C'était peu probable, mais c'était rigolo de l'imaginer !

Sur un banc, tout près, était assis un vieux monsieur élégant, avec une moustache en guidon de vélo et l'allure d'un « scientifique ». Grand Dieu ! C'était le portrait d'Ernest Rutherford, celui qui découvrit le noyau atomique. Je m'assis et engageai une conversation avec lui. Ce ne pouvait évidemment pas être Rutherford, à moins que ce dernier ne fût sorti de sa tombe : Rutherford était mort depuis bientôt soixante ans. Peut-être un de ses enfants ?

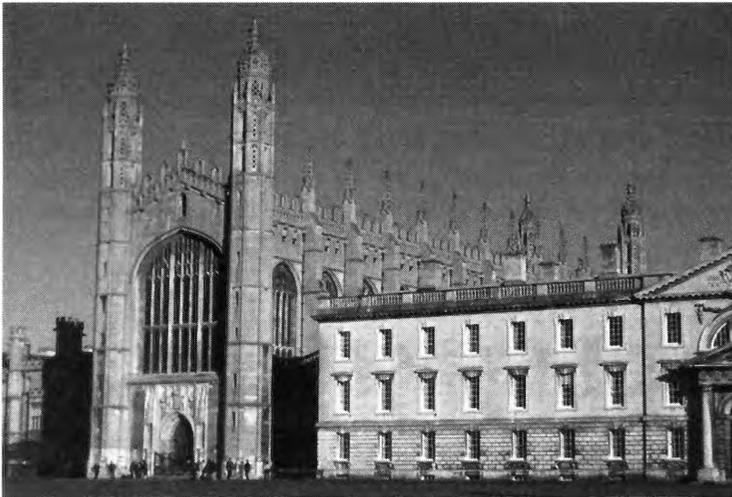
Mon copain du banc connaissait bien le nom d'Ernest Rutherford, le Néo-Zélandais qui découvrit l'énergie atomique. Mais, en

1. Cambridge signifie, mot à mot, « pont (*bridge*) sur la Cam », la rivière sur laquelle la ville s'est bâtie. (*N.d.T.*)

dépité de la forte ressemblance, il ne faisait pas partie de sa famille. Il était plus probablement un de mes lointains cousins : il s'agissait d'un postier juif à la retraite, intéressé par les sciences comme un amateur. Son nom était Goodfriend¹, vraisemblablement une anglicisation de Gutefreund à la génération précédente.

Ma balade dès potron-minet me fit dépasser Silver Street, où un bâtiment ancien avait abrité le Département de mathématiques appliquées et de physique théorique et où John Polkinghorne m'avait accueilli. Mais tout change, même à Cambridge. Les mathématiques (« maths » dans la terminologie universitaire britannique) s'étaient réfugiées sur un nouveau site, près du Newton Institute.

Puis, je vis au loin une bâtisse imposante. Elle m'apparut d'un coup, comme flottant dans les airs, dressée vers les cieux : la chapelle de King's College, dans la God's House, la Maison de Dieu, de Cambridge. Physiquement, elle dominait de nombreuses maisons des sciences...



Sur combien de générations les étudiants en sciences ont-ils prié – à tout le moins fait semblant – dans cette cathédrale ? Par curiosité, je pénétrai dans ces lieux saints. Dans un tel environnement, même un scientifique tel que moi, sans un atome de religion, découvrirait une certaine dose de sainteté dans ma croyance que

1. Une francisation du même nom aurait pu être « Bonnami ». (N.d.T.)

rien n'existe en dehors des électrons, des neutrons et des protons, que l'évolution n'est jamais qu'une compétition dans un jeu vidéo entre les gènes les plus égoïstes. La « cathédralité », le respect éveillé par un tas de pierres astucieusement assemblées et des vitres en verre coloré : je suis presque, mais pas complètement, immunisé...

Tout cela conduisit le fil de mes pensées à un aspect de l'univers académique britannique qui m'avait intrigué depuis longtemps : le mélange incongru de traditions religieuses et scientifiques. Cambridge et Oxford, toutes deux fondées par des ecclésiastiques au XII^e siècle, ont regroupé, animées par un même enthousiasme, ce qu'aux États-Unis nous nommons, par euphémisme, des communautés fondées sur la foi et d'autres fondées sur le réel. Plus curieux encore, tout cela se fait avec un esprit de tolérance qui me confond. Prenez, par exemple, les noms de neuf des écoles les plus célèbres de Cambridge : Jesus College, Christ's College, Corpus Christi College, Magdalene College, Peterhouse, St. Catherine's College, St. Edmund's College, St. John's College et Trinity College. Mais aussi Wolfson College, ainsi nommé en l'honneur d'Isaac Wolfson, un Juif laïc. Plus surprenant encore, on trouve le Darwin College, du nom de celui dont l'œuvre principale aura été de chasser Dieu des sciences de la vie...

L'histoire est longue et haute en couleur. Isaac Newton a plus fait que quiconque pour bannir les croyances en des phénomènes surnaturels. Inertie (masse), accélération et loi de la gravitation universelle ont remplacé la main de Dieu qui n'était désormais plus nécessaire pour guider les planètes. Mais, comme les historiens du XVII^e siècle se plaisent à nous le rappeler, Newton était chrétien, un chrétien dévot. Il consacra plus de temps, d'énergie et d'encre à la théologie qu'à la physique.

Pour Newton et ses pairs, l'existence d'un Créateur intelligent a dû être une nécessité intellectuelle : comment expliquer autrement l'existence de l'Homme ? Dans la vision du monde qu'avait Newton, rien ne pouvait expliquer la création de corps aussi complexes qu'un être humain pensant à partir de la matière inanimée. Newton avait des raisons en nombre plus que suffisant de croire en une origine divine.

Mais, là où Newton avait échoué, ce fut le terriblement subversif (malgré lui) Charles Darwin (lui aussi de Cambridge) qui réussit. Le concept de Darwin de sélection naturelle, ajouté à la

double hélice de Watson et Crick (elle aussi découverte à Cambridge), a remplacé la création magique par le calcul des probabilités et les lois de la chimie.

Darwin était-il ennemi de la religion ? Pas du tout. Il avait sans doute perdu la foi et se considérait comme un agnostique. Mais, en même temps, il était un pilier de son église paroissiale et un ami proche de son pasteur, le révérend John Innes.

Bien entendu, tout n'a pas été toujours rose. L'histoire de la querelle (à propos de l'évolution) entre Thomas Huxley et l'évêque Samuel Wilberforce, Soapy Sam, Sam la Savonnette, a eu son côté rude. L'évêque demanda à Huxley qui, de sa grand-mère ou de son grand-père, avait été le singe. Huxley lui retourna le compliment en l'accusant de prostituer la vérité¹. Mais personne ne fut tué, blessé ou seulement frappé. Tout se passa dans le respect des traditions de courtoisie qui prévalent dans les relations académiques britanniques.

Qu'en est-il aujourd'hui ? De nos jours encore, science et religion continuent de coexister de façon très comme il faut. John Polkinghorne, celui qui m'avait fait traverser la pelouse, n'est plus professeur de physique. En 1979, il a démissionné de son poste de professeur pour entamer des études afin de devenir prêtre anglican. Polkinghorne est au premier plan des partisans de cette opinion en vogue qui veut que science et religion abordent une phase de convergence parfaite et que les intentions de Dieu s'expriment à travers l'extraordinaire tournure des *lois de la nature*. Ces dernières sont non seulement extraordinairement improbables mais

1. Cette version célèbre est aujourd'hui contestée. Le bicentenaire de la naissance de Darwin ayant été l'occasion de nombreuses recherches et publications, citons un article de Michel de Pracontal paru sur le site du *Nouvel Observateur* (<http://bibliobs.nouvelobs.com/blog/darwin/20090504/12314/darwin-1860-et-ta-grand-mere>) : « [le philosophe des sciences britanniques] John Lucas invoque un témoin de l'événement, le révérend Canon Farrar. Bien qu'écclesiastique, Farrar n'est pas un ennemi de Huxley. En 1899, il écrit à Leonard Huxley, le fils de Thomas, une lettre détaillée dans laquelle il affirme que le sens de la phrase de Wilberforce, sinon les mots exacts, est celui-ci : "Si quelqu'un voulait rattacher son ascendance à un singe du côté de son grand-père, ne voudrait-il pas en faire autant du côté de sa grand-mère?" Rien, donc, d'une charge agressive contre Huxley. Lequel n'a sûrement pas riposté par une formule assassine. Autant qu'on puisse en juger, les assistants n'ont pas eu l'impression d'une victoire par KO du Bouledogue de Darwin, mais plutôt d'un match nul. Et Wilberforce a tenu un discours d'un bon niveau scientifique, soulevant des arguments sérieux. Il les avait d'ailleurs développés dans un article sur *L'Origine des espèces* paru dans *The Quarterly Review*, qualifié par Darwin lui-même de "singulièrement intelligent". » (N.d.T.)

sont façonnées très exactement pour garantir l'existence d'une vie intelligente – une vie qui, accessoirement, peut apprécier Dieu et ses lois¹. Polkinghorne est aujourd'hui un des ecclésiastiques parmi les plus éminents en Grande-Bretagne. Je ne sais pas s'il a encore le droit de traverser la pelouse...

Dans le même temps, le célèbre évolutionniste Richard Dawkins mène la charge contre toute supposition de convergence entre science et religion. D'après lui, vie, amour, moralité ne sont que les conséquences d'une lutte à mort non pas entre des individus mais entre des gènes égoïstes. Le monde intellectuel britannique semble être assez grand pour contenir à la fois Dawkins et Polkinghorne.

Mais revenons à la chapelle de King's College. Dans la lumière du matin filtrée par les vitraux, il était difficile de ne penser qu'en termes d'optique. C'est pourquoi, petit exemple de cathédralité, je me suis assis sur un banc pour mieux saisir cette vue impressionnante.



Avant longtemps, je fus rejoint par un homme d'aspect austère – grand, bien charpenté mais sans être gros, avec une allure qui

1. J'ai exprimé mes opinions sur ces sujets dans mon livre *The Cosmic Landscape : String Theory and the Illusion of Intelligent Design* (2005). (Traduction française de Bella Arman sous le titre *Le Paysage cosmique : notre univers en cachera-t-il des millions d'autres ?* – Robert Laffont, 2007.)

m'est apparue comme absolument pas britannique. Il portait une chemise bleue de coton grossier du même type que le bleu de chauffe de ma jeunesse ; avec son pantalon en velours côtelé marron retenu par de larges bretelles, il ressemblait à un habitant de l'Ouest américain du XIX^e siècle. Je n'étais pas très loin : il avait l'accent de l'ouest du Montana, pas de l'Est anglican.

Une fois que nous nous fûmes reconnus comme Américains, notre conversation se porta sur la religion. Non, dis-je, je n'étais pas là pour prier. En fait, je n'étais pas un chrétien mais un enfant d'Abraham venu là pour admirer l'architecture. Lui travaillait dans le bâtiment et s'était aventuré dans la chapelle de King's College pour regarder comment était fait l'ouvrage. Bien que profondément religieux, il n'était pas sûr qu'on puisse prier convenablement dans cette église. Il appartenait à l'Église de Jésus-Christ des saints des derniers jours¹. Il se méfiait de l'Église d'Angleterre. Quant à moi, je ne voyais aucune raison de le décevoir par mon profond scepticisme – mon rejet complet de la foi religieuse que je considère comme relevant d'une forte croyance en des pouvoirs surnaturels.

Je ne savais presque rien des convictions des mormons. Mon unique expérience en ce domaine venait de ce que j'ai eu pour voisins les membres d'une charmante famille de mormons. Tout ce que je savais est que les mormons se refusent catégoriquement à boire du café, du thé ou du Coca-Cola. Je présimai que les mormons étaient une branche caractéristique du protestantisme du nord de l'Europe. Je fus donc surpris lorsque ma nouvelle connaissance m'expliqua que les mormons étaient comme les Juifs. Sans terre où vivre, ils ont suivi leur Moïse à eux à travers le désert, bravant toutes sortes de dangers et de privations jusqu'à ce qu'ils parviennent à leur terre où coulent le lait et le miel² – la région du Great Salt Lake, le grand lac salé, dans l'Utah.

Mon interlocuteur s'assit à califourchon sur le banc, les avant-bras posés sur ses genoux écartés, ses grandes mains jointes entre eux. L'histoire qu'il m'a contée ne remontait pas à une brumeuse Antiquité mais était une histoire américaine ayant débuté autour de 1820. Je suppose que j'aurais dû savoir tout cela, mais ce n'était

1. Il s'agit de l'Église mormone dont le siège est aux États-Unis, à Salt Lake City, dans l'Utah. (N.d.T.)

2. Il s'agit d'une allusion biblique. Dans l'Ancien Testament, Moïse cherche à conduire les Hébreux à la Terre promise, à Canaan, « le pays où coulent le lait et le miel ». (N.d.T.)

pas le cas. Voici en gros les éléments tels que je me les rappelle, complétés par les notes historiques que j'ai lues plus tard.

Joseph Smith naquit en 1805 d'une mère qui souffrait d'épilepsie et avait de puissantes visions religieuses. Un jour, l'ange Moroni vint à lui et lui murmura le secret des antiques plaques cachées faites d'or pur et sur lesquelles étaient inscrits les mots de Dieu. Ces mots étaient destinés à n'être révélés qu'à Smith, mais il y avait un piège : ces inscriptions étaient rédigées dans une langue qu'aucune personne vivante ne pouvait déchiffrer.

Moroni rassura Joseph : il lui fournirait une paire de pierres transparentes magiques – une paire de lunettes surnaturelles. Les pierres avaient pour nom Urim et Thummim. Moroni ordonna à Joseph de mettre Urim et Thummim dans son chapeau : en regardant attentivement dans le sac, Joseph pourrait voir les inscriptions magiques divulguées en pur anglais.

Quand j'entendis cette histoire, ma réaction fut de rester tranquillement assis comme si je pensais intensément. Ou bien on a la foi, ou bien on ne l'a pas, du moins c'est ce que je présume. Et, si on ne l'a pas, une histoire d'assiettes d'or devant être vues à travers des lunettes magiques placées dans un chapeau est très drôle. Mais, drôle ou pas, plusieurs milliers de croyants ont suivi Joseph Smith après quoi, suite à la mort violente de Smith à l'âge de trente-huit ans, ils suivirent son successeur, Brigham Young, à travers de grands dangers et de pénibles tourments. Aujourd'hui, les descendants religieux de ces croyants sont des dizaines de millions.

Accessoirement, vous vous demandez peut-être ce qui arriva aux plaques en or qu'Urim et Thummim permirent à Joseph de déchiffrer. La réponse est qu'après les avoir traduites en anglais, il les perdit.

Il faut dire que Joseph Smith était très charismatique et exerçait un grand attrait sur les personnes du sexe opposé. Cela doit avoir fait partie des desseins divins. Dieu a ordonné à Joseph d'épouser et féconder le plus de jeunes filles possible. Il lui a aussi demandé de réunir de nombreux adeptes et de les conduire à la première version de la Terre promise, un lieu nommé Nauvoo, dans l'Illinois. Quand, suivi de ses fidèles, il y parvint, ce fut pour annoncer qu'il briguait la présidence des États-Unis. Mais les gens comme il faut de Nauvoo étaient de bons chrétiens – des chrétiens conventionnels – et n'aimaient pas beaucoup ses idées sur la polygamie. Ils l'ont donc tué.

Exactement comme le manteau de Moïse fut transmis à Josué, l'autorité de Smith passa à Brigham Young, un autre homme à amours multiples et nombreuse progéniture. L'exode des mormons commença par un départ précipité de Nauvoo. En fin de compte, Young les accompagna à travers un long, difficile et dangereux périple vers l'Utah.

J'étais fasciné par cette histoire – je le suis toujours. Je crois qu'à l'époque elle a eu de l'influence sur ce que je ressentais – sans nul doute d'une façon tout à fait injuste – à propos de Stephen capable d'influencer de nombreux physiciens par son puissant charisme. Obsédé par mes propres frustrations, je l'imaginai en joueur de flûte¹ conduisant une croisade mensongère contre la mécanique quantique.

Mais, ce matin-là, je n'avais en tête ni Stephen ni les trous noirs. La chapelle de King's College m'avait fourni de quoi m'obséder avec un nouveau paradoxe scientifique. Il n'avait rien à voir avec la physique, sinon de façon indirecte. Il avait plutôt rapport avec l'évolution selon Darwin. Comment se pouvait-il que les êtres humains aient développé une si forte propension à inventer des systèmes de croyance irrationnels et à s'y fier avec une telle ténacité ? On aurait pu croire que la sélection naturelle aurait renforcé les tendances à la rationalité et éliminé toute disposition génétique favorable aux superstitions, aux systèmes basés sur la foi. Après tout, une croyance irrationnelle peut faire que quelqu'un est tué, comme cela est arrivé à Joseph Smith. Sans aucun doute, de telles croyances ont fait des millions de morts... On aurait pu s'attendre à ce que l'évolution supprime les tendances à suivre des dirigeants irresponsables sur le terrain de la foi. Mais il semble que ce soit exactement le contraire. C'est à Cambridge que, pour la première fois, ma curiosité fut piquée par ce paradoxe scientifique. Depuis, il m'a fasciné et j'ai passé pas mal de temps à essayer de le démêler.

Durant les quelques semaines que j'ai passées à Cambridge, je me suis apparemment égaré bien loin de ce qui m'y avait conduit :

1. Il s'agit d'une allusion à la légende du joueur de flûte de Hameln : en 1284, les habitants de la ville allemande de Hameln voulaient la débarrasser de ses rats et promirent une prime à un dératiseur s'il y parvenait. Ce dernier, par le chant de sa flûte, charma tous les rats et les conduisit à la rivière où ils se noyèrent. Les habitants n'ayant pas honoré leur promesse, le joueur de flûte revint et, attirant cette fois tous les enfants de Hameln, les emmena et les perdit dans une grotte qui se referma sur eux. (N.d.T.)

le comportement quantique des trous noirs. Mais ce n'était pas tout à fait vrai. Ce qui me troublait inconsciemment était de savoir si des scientifiques comme Hawking, 't Hooft, moi-même et les autres combattants de la guerre du trou noir pouvions être les jouets d'illusions assises sur la foi.

Ces semaines à Cambridge furent inquiétantes et remplies de pensées mélodramatiques. L'histoire d'Achab et du cachalot est ambiguë. Est-ce le cachalot rendu fou qui entraîne Achab au fond de la mer ou est-ce Achab le dément qui conduit le faible Starbuck à sa perte ? Plus précisément, était-ce moi qui, comme Achab, pourchassait une folle obsession ou était-ce Stephen qui séduisait les autres avec une idée mensongère ?

Je dois admettre qu'aujourd'hui je trouve hilarante cette image de Stephen en joueur de flûte ou en ermite (à l'instar du croisé français Pierre l'Ermite) conduisant ses disciples fanatisés. À l'évidence, l'obsession est une puissante drogue hallucinogène.

Mais je ne voudrais pas vous donner l'impression que j'ai consacré plusieurs semaines à errer sans but dans les rues de Cambridge, prisonnier de mes sombres pensées. Il était prévu que je donne une série de conférences à propos de la complémentarité du trou noir au Newton Institute. J'y ai passé pas mal de temps à préparer mes exposés et à discuter divers points avec mes collègues sceptiques.

Au Newton Institute

Il devait être dix heures du matin quand j'ai quitté la chapelle de King's College et me suis avancé sous le soleil de juin. Le mystère darwinien de la foi irrationnelle s'était infiltré dans mon esprit mais j'avais un problème technique bien plus pressant pour lequel il fallait une solution immédiate : trouver le Newton Institute !

Mon plan pratiquement inutilisable me faisait quitter le centre du vieux Cambridge pour aller vers un quartier résidentiel d'allure moderne et sans trop de caractère. J'espérais qu'il s'agissait d'une erreur : cela ne concordait pas avec mes sentiments romantiques. Je remarquai un panneau indiquant Wilberforce Road. Se pourrait-il qu'il s'agisse de Soapy Sam, Sam la Savonnette, le même Wilberforce que celui qui avait demandé à Huxley qui, de son grand-père ou de sa grand-mère, avait été singe ? Peut-être l'Histoire et son romantisme ne seraient-ils pas tout à fait absents...

En fait, c'était encore mieux que cela : Wilberforce Road avait été ainsi nommée en l'honneur du père de Samuel, William Wilberforce. William a joué un rôle admirable dans l'histoire d'Angleterre en ayant été un des chefs de file du mouvement abolitionniste visant à éliminer l'esclavage dans l'Empire britannique.

Finalement, je quittai Wilberforce pour tourner dans Clarkson Road. En voyant le Newton Institute, je fus une nouvelle fois déçu. Il s'agissait d'un bâtiment contemporain – pas vraiment affreux mais construit avec les matériaux modernes habituels : verre, briques et acier.



Le Newton Institute

Mais la consternation se changea bientôt en admiration dès que j'eus pénétré dans la bâtisse. Son architecture correspondait exactement à ce à quoi elle était destinée : opposer et échanger des idées – anciennes, nouvelles, aussi bien que celles qui n'avaient pas encore été mises à l'épreuve – à travers des débats enflammés ; frapper au cœur les théories fausses ; et aussi, du moins je l'espérais, rencontrer et défaire ses adversaires. Un grand hall très lumineux permettait de s'asseoir sur de nombreuses chaises, d'écrire sur des tables, tandis que la plupart des murs s'ornaient de tableaux noirs. Plusieurs petits groupes étaient installés autour de tables de

café, ces dernières étant recouvertes de ces bouts de papier sur lesquels les physiciens ont toujours griffonné.

J'avais l'intention de rejoindre à leur table Gary Horowitz, Jeff Harvey et deux autres amis mais, avant que je n'aie pu le faire, mon attention fut attirée ailleurs : il s'agissait d'une conversation d'une autre sorte, et je cédai à la tentation d'écouter aux portes. Dans un coin à l'écart, le roi tenait sa cour : Stephen, assis au centre, légèrement surélevé sur son trône mécanique, était en train de subjuguier un groupe de journalistes britanniques. À l'évidence, l'interview ne portait pas sur la physique mais sur la personne de Stephen. Quand je suis arrivé, il était en train de parler de sa propre histoire et de sa maladie anémiant. Son histoire devait avoir été préenregistrée mais, comme toujours, quelque chose d'indicible émanant de sa personnalité propre habitait la voix robotisée.

Les journalistes étaient captivés, chacun guettant sur le visage de Stephen de subtils indices pendant qu'il parlait de sa jeunesse avant qu'on ait diagnostiqué la maladie de Charcot. D'après son témoignage, ces années de jeunesse avaient été marquées par une sensation d'abattement – celui qu'éprouve un jeune homme qui ne sait pas où il va. Il avait vingt-quatre ans, était un étudiant ordinaire en physique, ne faisant que peu de progrès : un peu paresseux, sans grande ambition. C'est alors que sonna le premier coup de minuit, le terrifiant diagnostic, l'annonce d'une mort certaine. La mort est certaine pour tout le monde mais, dans le cas de Stephen, elle était imminente : un an, peut-être deux, selon toute vraisemblance même pas un délai suffisant pour terminer son doctorat.

Au début, Stephen fut saisi de terreur et plongea dans la dépression. Il avait des cauchemars d'exécution sommaire. Mais il se produisit quelque chose d'inattendu : pour une raison ou une autre, la crainte de la mort imminente fut remplacée par la perspective de quelques années de rémission. Le résultat en fut une soudaine et débordante joie de vivre. L'abattement céda la place à un féroce besoin de laisser sa marque en physique, de se marier, d'avoir des enfants et de connaître du monde tout ce qu'il peut offrir dans le temps qui lui restait, quel qu'il soit. Stephen expliqua aux journalistes quelque chose de stupéfiant, d'inoubliable, quelque chose que j'aurais balayé comme pure connerie si c'était quelqu'un d'autre qui l'avait dite : il a expliqué que le fait d'être frappé par la maladie – une maladie très invalidante – avait été la meilleure chose qui ait pu lui arriver.

Je ne pratique pas volontiers le culte des héros. J'ai pu admirer certains hommes de sciences ou de lettres pour leur clarté et leur profondeur, mais je ne dirais pas qu'ils sont mes héros. Jusqu'à ce jour, le seul géant qui occupait mon panthéon de héros était le grand Nelson Mandela. Mais, en écoutant aux portes dans le Newton Institute, j'en vins brusquement à voir en Stephen un personnage véritablement héroïque – un homme suffisamment grand pour remplir les chaussures de Moby Dick, si tant est que les cachalots portent des chaussures.

Mais je pouvais aussi voir – en tout cas je l'imaginai – avec quelle facilité cet homme pourrait devenir un joueur de flûte. Je vous rappelle l'impressionnant silence de cathédrale qui remplit les grandes salles de conférences quand Stephen compose sa réponse à une question.

Pareil traitement fait à Stephen n'était pas l'apanage du seul milieu universitaire. Une fois, nous mangions ensemble avec Stephen, son épouse et un de ses anciens étudiants ayant brillamment réussi, Raphael Rouso. Cela se passait dans le centre du Texas, dans un authentique restaurant de routier – du genre que pouvez trouver sur n'importe quelle autoroute américaine. Nous avions déjà commencé notre repas – Elaine, Raphael et moi-même devisant, Stephen essentiellement écoutant – lorsqu'un serveur plein de respect reconnut Stephen. Il s'approcha avec l'admiration, la vénération, la crainte et l'humilité d'un catholique dévot rencontrant le pape à un dîner. Il s'est pratiquement jeté aux pieds de Stephen, réclamant une bénédiction pendant qu'il avouait l'attirance personnelle profonde qu'il avait toujours éprouvée pour le grand physicien.

Nul doute que Stephen apprécie d'être une super-célébrité : c'est un des rares moyens dont il dispose pour communiquer avec le reste du monde. Apprécie-t-il, ou encourage-t-il, une telle vénération quasi religieuse ? Il n'est pas facile de dire ce qu'il pense mais j'ai passé suffisamment de temps avec lui pour pouvoir lire les expressions de son visage – du moins jusqu'à un certain point. Le signe subtil qui est apparu sur son visage au restaurant du Texas évoquait la contrariété, pas le plaisir.

Mais revenons à ce qui faisait l'objet de mon voyage en Angleterre : convaincre Stephen que sa foi dans la perte de l'information était une erreur. Malheureusement, les discussions directes avec Stephen me sont pratiquement impossibles : je n'ai pas la patience

d'attendre plusieurs minutes pour une réponse de seulement quelques mots. Mais il y en a d'autres – comme Don Page, Gary Horowitz et Andy Strominger – qui ont passé pas mal de temps à échanger et collaborer avec lui : ils ont appris comment communiquer bien plus efficacement que moi.

Ma stratégie s'appuyait sur deux choses. D'abord sur le fait que les physiciens aiment parler, et je suis très bon pour lancer des conversations. En fait, je le suis tellement que les physiciens, quand bien même ils seraient en désaccord avec moi, ont tendance à affluer aux palabres que j'ai provoqués. Chaque fois que je me rends dans un département de physique, des mini-séminaires éclosent, même dans les endroits les plus tranquilles. Je savais donc qu'il serait facile de réunir quelques-uns de nos amis à Stephen et moi (ils étaient vraiment mes amis, même si je voyais en eux l'ennemi dans la guerre du trou noir) et de commencer à débattre. J'étais aussi certain que Stephen serait attiré – le tenir à l'écart d'une controverse sur la physique, c'est comme maintenir un chat loin de la coupe de lait – et, avant longtemps, nous finirions tous deux par nous battre comme des chiffonniers jusqu'à ce qu'un des deux camps reconnaisse sa défaite.

Je comptais aussi sur la force de mes arguments et la faiblesse de ceux de la partie adverse : je n'avais aucun doute que je finirais par l'emporter.

Tout se passa à merveille, en dehors d'un petit détail : Stephen ne s'est jamais joint à nous. Il se trouva qu'il était particulièrement souffrant et nous le vîmes peu. Il s'ensuivit que la bataille se passa exactement de la même façon que celles que j'avais déjà menées aux États-Unis depuis plusieurs années. Le cachalot s'éclipsait sans que j'aie pu lui décocher un trait.

Un jour ou deux avant mon départ de Cambridge, il était prévu que je donne une conférence en bonne et due forme à l'ensemble de l'Institut sur la complémentarité du trou noir. C'était ma dernière chance d'avoir une confrontation avec Stephen. La salle de conférences était pleine à craquer. Stephen entra alors que j'allais commencer et resta au fond. En temps normal, il se met sur le devant mais, cette fois, il n'était pas seul : son infirmière et un autre assistant étaient à ses côtés au cas où il aurait besoin de soins médicaux. Il était évident qu'il n'allait pas bien et il s'en alla alors que la conférence n'en était qu'à mi-parcours. Ainsi vont les choses : Achab avait manqué sa chance.

La conférence s'acheva aux environs de dix-sept heures et j'en avais assez du Newton Institute. Je voulais quitter Cambridge. Anne était partie en visite avec une amie, me laissant la voiture de location. Au lieu de rentrer à l'appartement, je m'éloignai et entrai dans un pub après avoir dépassé le village le plus proche, Milton. Je ne suis pas un buveur ; boire seul ne fait absolument pas partie de mes habitudes mais, ce jour-là, je voulais vraiment me poser et boire tranquillement une bière. Je ne recherchais pas particulièrement la solitude : je voulais seulement ne plus voir de physiciens.

C'était un pub de campagne caractéristique, avec sa serveuse ayant la cinquantaine et quelques habitués au bar. L'un d'eux avait je dirais dans les quatre-vingts ans, avec son costume marron et son nœud papillon, appuyé sur une canne. Je ne crois pas qu'il était irlandais, mais il ressemblait énormément à l'acteur Barry Fitzgerald, celui qui donne la réplique à Bing Crosby dans *Going My Way*¹. (Fitzgerald jouait le rôle d'un prêtre bourru au grand cœur.) Le client était lancé dans une querelle bon enfant avec la serveuse qui l'appelait Lou.

Pratiquement sûr qu'il ne s'agissait pas d'un physicien, je me glissai au bar, juste à côté de Lou, et commandai ma bière. Je ne me rappelle pas exactement comment s'amorça notre conversation, mais il m'expliqua qu'il avait fait une courte carrière militaire qui prit fin quand il perdit une jambe lors de la guerre, ce que je compris comme étant la Seconde Guerre mondiale. Sa jambe absente ne semblait pas l'empêcher de se tenir au bar.

La conversation passa inévitablement à qui j'étais et ce que j'étais venu faire à Milton. Je n'étais pas d'humeur à parler de physique, mais je ne voulais pas mentir à ce vieux gentleman. Je lui expliquai que j'étais à Cambridge pour une conférence sur les trous noirs. Sur quoi il se mit à m'expliquer qu'il était expert sur le sujet et serait capable de me raconter bien des choses que je pourrais bien ignorer. La conversation prenait un tour curieux. Il affirma que, selon une légende familiale, un de ses ancêtres s'était retrouvé dans le trou noir mais en était sorti au dernier moment.

De quel trou noir parlait-il ? Les cinglés qui ont une théorie sur les trous noirs se trouvent à la pelle et sont en général barbants, mais cet homme-là ne ressemblait pas aux dingues habituels. Il prit

1. *La Route semée d'étoiles*, dans sa version française. Film américain de Leo McCarey (1944). Oscar du meilleur film, du meilleur réalisateur, du meilleur acteur (Crosby) et du meilleur second rôle (Fitzgerald). (*N.d.T.*)

une petite gorgée de bière et poursuit en m'expliquant que le Trou noir de Calcutta était un sacrement sale coin, aussi affreux qu'il est possible.

Le Trou noir de Calcutta ! Il était clair qu'il croyait que j'étais venu à Cambridge pour une sorte de rencontre sur l'histoire des Indes britanniques. J'avais entendu parler du Trou noir de Calcutta mais n'avais aucune idée de ce que c'était. J'avais un vague souvenir à propos d'une maison close où les soldats britanniques peu méfiants étaient dévalisés avant d'être assassinés.

Je fis le choix de ne pas chercher à clarifier la question et de plutôt me documenter autant que je le pourrais sur le Trou noir originel. Il s'agit d'une histoire controversée mais il semble bien qu'il s'agissait d'une cellule, peut-être un donjon, dans un fort britannique qui fut envahi par les forces ennemies en 1756. Un grand nombre de soldats britanniques y furent piégés pendant la nuit et moururent étouffés, probablement accidentellement¹. D'après la légende familiale remontant à sept générations, un des ancêtres de Lou avait simplement échappé à cette mort.

Ainsi, j'avais trouvé un cas où l'information s'était échappée d'un trou noir... Si seulement Stephen avait pu être là pour l'entendre !

1. Cet épisode de la colonisation de l'Inde par l'Angleterre repose sur le témoignage d'un seul homme, John Holwell, qui aurait fait partie des 23 rescapés sur les 146 soldats britanniques qui seraient morts d'étouffement dans le donjon. Ce témoignage servit de base à la justification de toutes les exactions qui furent commises au cours de la colonisation. Le site en français de Wikipédia affirme que les choses n'ont pas pu se produire telles que Holwell les a rapportées : il aurait fallu que 146 soldats soient entassés vivants dans une pièce de huit mètres sur six. (*N.d.T.*)

L'univers est un hologramme

Bouleversons le paradigme dominant.

Lu sur un autocollant

En quittant Cambridge, j'avais compris que la faute n'incom-bait pas à Stephen et aux relativistes. Des heures de discussion – particulièrement avec Gary Horowitz (le H de CGHS), du parti des relativistes – m'avaient convaincu qu'il en était autrement. Gary n'est pas seulement un sorcier des équations de la relativité générale. C'est aussi un penseur pénétrant qui aime aller au fond des choses. Il avait consacré de nombreuses heures de réflexion au paradoxe de Stephen et, bien qu'il eût une claire compréhension des dangers de la perte de l'information, il était parvenu à la conclusion qu'il fallait que Stephen ait raison – il ne trouvait aucune autre issue que la perte de l'information lors de l'évaporation d'un trou noir. Je lui expliquai une nouvelle fois la complémentarité du trou noir. Il comprenait tout parfaitement mais pensait que le saut était trop grand. Postuler que l'incertitude de la mécanique quantique agit à une aussi grande échelle qu'un énorme trou noir semblait tiré par les cheveux. À l'évidence, il ne s'agissait *pas* de paresse intellectuelle. Tout venait de la seule question : en quels principes croyez-vous ?

Dans le vol du départ, je me rendis compte que le vrai problème était l'absence de fondations mathématiques solides de la complémentarité du trou noir. Même Einstein avait été incapable de convaincre la plupart des autres physiciens que sa théorie corpusculaire de la lumière était juste. Il a fallu une vingtaine d'années, une expérience décisive et les théories mathématiques abstraites de Hei-

senberg et Dirac pour régler la question. Il me paraissait clair qu'on ne pourrait jamais vérifier expérimentalement la complémentarité du trou noir. (Je me trompais.) À défaut, il était possible de lui donner des fondements mathématiques plus rigoureux.

En quittant l'Angleterre, je ne m'imaginai pas que, moins de cinq ans plus tard, la physique mathématique en viendrait à adopter une des idées philosophiquement les plus dérangeantes de tous les temps : d'une certaine façon, le robuste univers à trois dimensions de notre expérience n'est qu'illusion. Et je n'imaginai pas non plus à quel point cette découverte grandiose en viendrait à changer le cours de la guerre du trou noir.

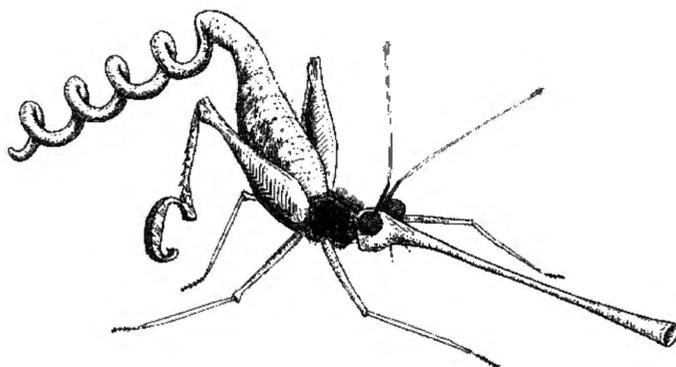
Hollande

Au revoir, bonne vieille Angleterre ! Bonjour Hollande, moulins à vent et hommes de haute taille ! Avant de rentrer chez moi, j'allai rendre visite à mon ami Gerard 't Hooft. Le vol pour Amsterdam fut rapide et nous partîmes, Anne et moi, pour Utrecht, une autre ville avec canaux et maisons étroites : Gerard y était professeur de physique – certains auraient dit *le* professeur de physique. En 1994, il n'avait pas encore reçu le prix Nobel mais personne ne doutait que ce fût pour bientôt.

Parmi les physiciens, le nom de 't Hooft est synonyme de monument de la science et, en Hollande – un pays dont je soupçonne qu'il a donné plus de grands physiciens par habitant que nul autre –, il est une sorte de trésor national. C'est pourquoi, quand nous arrivâmes à l'université d'Utrecht, je fus surpris de la modestie du bureau qu'occupait Gerard. Cet été-là, l'Europe était une fournaise. La Hollande, en dépit de sa réputation de froid pluvieux, était insupportable. Le bureau exigü de 't Hooft était comme tous les autres : sans même l'air conditionné. Si je me souviens bien, il se trouvait du côté du bâtiment qui était desséché par le soleil et je me demandais par quel miracle sa grande plante verte exotique n'était pas morte de chaud. Comme invité, on m'avait attribué juste à côté un bureau plus à l'ombre mais encore trop chaud pour travailler ou seulement discuter de notre passion commune : les trous noirs.

Les week-ends, Anne et moi partions avec Gerard dans sa voiture faire le tour des petits villages qui se trouvaient à proximité

d'Utrecht et où il faisait plus frais. Comme de nombreux grands scientifiques, 't Hooft a une immense curiosité pour tout ce qui touche à la nature – pas seulement la physique, toute la nature : s'interroger sur l'évolution que peuvent avoir les animaux dans un monde de pollution urbaine l'a conduit à dessiner toute une ménagerie de créatures futuristes. Voici une de ses créations – vous pouvez en trouver d'autres sur sa page web à l'adresse suivante : www.phy.uu.nl/~thooft.



Het Wijndiefje (« Voleuse de vin »), *Bacchus deliriosus*. On trouve ce parasite près des pubs. Parfaitement équipé pour ouvrir bouteilles et cannettes de toutes sortes, il peut devenir tout à fait nuisible s'il parvient à infecter votre cellier.

'T Hooft est aussi peintre et musicien amateur. Anne peint également et joue du piano : c'est pourquoi, quand nous étions dans la voiture ou attablés le midi dans un petit village – devant des pancakes néerlandais, de l'eau minérale fraîche et force crèmes glacées –, nous discussions d'un peu tout, depuis la forme des coquillages et l'évolution à venir de la vie sur une planète polluée jusqu'à la peinture hollandaise et la technique du piano. Mais pas de trous noirs.

Pendant la semaine, nous parlions un peu de physique. Gerard est un éternel opposant qui aime à polémiquer et nos conversations étaient souvent ponctuées de répliques du genre : « Gerard, je suis complètement d'accord avec toi » et lui de répondre : « Peut-être mais, moi, je ne suis absolument pas d'accord avec toi. »

Je voulais discuter de quelque chose de bien précis. Il s'agissait d'une chose à laquelle je pensais depuis presque vingt-cinq ans, en rapport avec la théorie des cordes. Mais Gerard n'aimait pas la

théorie des cordes et réussir à l'amener à creuser sur ce terrain tenait de la corvée. Ce que je voulais discuter était la localisation des bits individuels d'information. Il y a une chose dans la théorie des cordes que j'avais rencontrée pour la première fois en 1969 et qui est complètement folle. Mais alors tellement folle que les théoriciens des cordes ne veulent pas en entendre parler.

La théorie des cordes affirme que tout, dans l'univers, est fait de cordes élastiques, microscopiques et unidimensionnelles. Les particules élémentaires tels les photons et les électrons sont de très petites boucles de cordes, chacune pas beaucoup plus grosses que l'échelle de Planck. (Ne vous tracassez pas si vous ne comprenez pas tous les détails : au prochain chapitre, je vous expliquerai les grandes lignes. Pour l'instant, contentez-vous d'accepter les prémisses.)

Le principe d'incertitude fait que ces cordes vibrent et fluctuent avec le mouvement au point zéro (voir chapitre 4), quand bien même elles n'ont pas d'énergie supplémentaire. Différentes parties de la même corde sont en mouvement relatif permanent les unes par rapport aux autres, étirant et étalant les minuscules parties sur une certaine distance. Cet étirement n'est pas un problème en soi : les électrons d'un atome se répartissent dans un volume bien plus grand que celui du noyau, la raison en étant là encore le mouvement au point zéro. Tous les physiciens considèrent qu'il va de soi que les particules élémentaires ne sont pas des points infiniment petits de l'espace. Nous présumons que les électrons, les photons et autres particules élémentaires sont au moins aussi grands que la longueur de Planck, peut-être plus. Le problème est que les mathématiques de la théorie des cordes ont pour conséquence un cas de soubresauts quantiques d'une absurde violence, avec des fluctuations si intenses que les bouts d'un électron s'éparpilleraient aux extrémités de l'univers. Pour la plupart des physiciens, y compris les théoriciens des cordes, cela paraît tellement fou que c'en est inimaginable.

Comment un électron pourrait-il être aussi grand que l'univers sans que nous le remarquions ? Vous vous demandez peut-être ce qui maintient les cordes dans votre corps et les empêche de se heurter à celles de mon corps, ou de s'emmêler avec elles, quand bien même nous serions séparés par des centaines de kilomètres. La réponse n'est pas simple. Tout d'abord, les fluctuations se font à toute vitesse sur l'échelle infinitésimale de temps fixée par le

temps de Planck. Mais elles sont aussi très finement accordées : entre deux cordes, il y a une correspondance subtile qui permet exactement d'annuler les nuisances. Malgré tout, si l'on pouvait observer les mouvements au point zéro les plus rapides d'une particule élémentaire, on verrait que les fluctuations de ses différentes parties conduisent aux confins de l'univers. En tout cas, c'est ce qu'affirme la théorie des cordes.

Ce comportement totalement curieux m'avait rappelé la plaisanterie que j'avais lancée à Lárus Thorlacius (voir p. 240) disant que le monde à l'intérieur d'un trou noir pourrait bien être comme un hologramme, les informations réelles se trouvant loin sur l'horizon bidimensionnel. La théorie des cordes, quand on l'examine sérieusement, va encore plus loin. Elle place chaque bit d'information, qu'il se trouve dans un trou noir ou dans le noir de l'encre d'un journal, sur les bords extérieurs de l'univers ou « à l'infini » si l'univers n'a pas de fin.

Sitôt que Gerard et moi abordions le sujet, ça coïncidait tout de suite. Mais, peu avant que je ne quitte Utrecht pour rentrer chez moi, Gerard dit quelque chose qui m'étonna : il affirma que, si nous pouvions observer, sur les murs de son bureau, les détails à l'échelle microscopique de Planck, nous y trouverions, en principe, chaque bit d'information sur l'intérieur de la pièce. Je ne me rappelle pas qu'il ait utilisé le mot *hologramme*, mais il était clair qu'il pensait exactement la même chose que moi : d'une certaine façon que nous ne comprenons pas, chaque bit d'information de l'univers est stocké très loin, aux confins les plus éloignés de l'espace. En fait, il m'avait dépassé : il fit référence à un article vieux de quelques mois dans lequel il avait discuté cette idée.

Notre conversation prit fin sur cette remarque et nous ne parlâmes que peu des trous noirs pendant les deux derniers jours que je passai en Hollande. Mais, en rentrant à mon hôtel ce soir-là, je mis au point une démonstration détaillée qui prouvait ceci : la quantité maximale d'information que peut contenir n'importe quelle région de l'espace ne peut être plus grande que ce qui peut être stocké sur son bord en utilisant un quart de bit par unité d'aire de Planck.

Une remarque sur ce *quart* qui revient tout le temps. Pourquoi *un quart de bit par aire de Planck* ? La réponse est très simple. Historiquement, l'unité de Planck a été mal définie : en fait, les physiciens devraient revenir en arrière et la redéfinir en sorte que

quatre unités d'aire de Planck n'en fassent plus qu'une. Je vais montrer le chemin. Désormais, la règle s'énonce comme suit :

L'entropie maximale d'une portion de l'espace est d'un bit par unité d'aire de Planck.

Retournons voir Ptolémée – nous l'avions rencontré au chapitre 7. Nous y avons imaginé qu'il craignait les complots à un point tel que les seules informations autorisées dans sa bibliothèque devaient être visibles depuis l'extérieur. Il s'ensuit qu'elles doivent être écrites sur les murs extérieurs. Avec un bit par aire de Planck, la bibliothèque de Ptolémée pourrait détenir un maximum de 10^{74} bits. C'est une quantité énorme d'information, bien plus importante que celle que n'importe quelle bibliothèque pourrait contenir mais cependant beaucoup plus petite que les 10^{109} bits à l'échelle de Planck qu'on aurait pu fourrer à l'intérieur. Ce que 't Hooft avait deviné et que j'avais prouvé dans ma chambre d'hôtel était que la loi imaginaire de Ptolémée correspondait à une authentique limitation de la quantité d'information qu'une région de l'espace peut contenir.

Pixels et voxels

Il n'y a pas de film dans un caméscope numérique moderne. Il y a une « rétine » bidimensionnelle remplie de cellules microscopiques sensibles à la lumière et qu'on appelle *pixels*. Toute image, qu'elle provienne d'un appareil numérique actuel ou qu'il s'agisse d'une peinture rupestre très ancienne, est un leurre : elle nous dupe en nous faisant croire que nous voyons des choses qui n'y sont pas, en représentant un monde à trois dimensions quand elle ne contient que des informations à deux dimensions. Dans *La Leçon d'anatomie*, Rembrandt nous floue en nous donnant à voir de la matière, des couches, de la profondeur là où il n'y a en réalité que des strates de peinture sur une toile bidimensionnelle.

Comment l'astuce peut-elle prendre ? Tout se passe dans notre cerveau où des circuits spéciaux fabriquent une illusion qui prend appui sur l'expérience antérieure : nous voyons ce que notre cerveau a été exercé à voir. Dans la réalité, la quantité d'information présente sur la toile n'est pas suffisante pour dire si les pieds du



cadavre sont vraiment plus proches ou simplement trop gros par rapport au reste du corps. Le corps est-il raccourci ou bien est-il simplement très court ? Les organes, le sang, les intestins qui se trouvent sous la peau ? Tout se passe dans notre tête. Pour ce qu'on en sait, cela pourrait tout aussi bien ne pas être un homme mais un mannequin de plâtre – voire une peinture bidimensionnelle. Voulez-vous lire ce qui est écrit sur le parchemin derrière la tête de l'homme le plus grand ? Essayez donc de faire le tour de la peinture pour y voir mieux : désolé, l'information ne s'y trouve pas ! L'image sur l'écran bourré de pixels de votre caméscope ne renferme pas non plus de réelle information tridimensionnelle : ce n'est que tromperie.

Est-il possible de construire un système électronique qui puisse contenir une information authentiquement tridimensionnelle ? Bien sûr ! Au lieu de remplir une surface avec des pixels à deux dimensions, imaginons que nous occupions un volume avec de minuscules cellules en trois dimensions – ce qu'on appelle parfois des *voxels*. Puisque l'ensemble des voxels est réellement tridimensionnel, il est facile d'imaginer que l'information codée puisse représenter fidèlement un objet solide du monde à trois dimensions. On est tenté de conjecturer un principe : l'information à deux dimensions peut être emmagasinée dans un ensemble de pixels bidimensionnels tandis que celle à trois dimensions ne peut être emmagasinée que dans un ensemble de voxels tridimensionnels.

On pourrait lui donner un nom raffiné du genre : *invariance de la dimensionnalité*.

La justesse apparente de ce principe est ce qui rend les hologrammes si surprenants. Un hologramme est un morceau de pellicule en deux dimensions, un ensemble de pixels bidimensionnels qui peut stocker tous les détails d'une scène tridimensionnelle. Il ne s'agit pas d'une contrefaçon créée dans notre cerveau. L'information est vraiment présente sur la pellicule.

Le principe des hologrammes ordinaires a été découvert en 1947 par le physicien hongrois Dennis Gabor. Les hologrammes sont des photographies inhabituelles faites de motifs d'interférences entrecroisés, faits de rayures, semblables à ceux que crée la lumière en passant à travers deux fentes. Dans un hologramme, le motif n'est pas engendré par des fentes mais par de la lumière dispersée par les différentes parties de l'objet qu'on veut représenter. La pellicule photo est remplie par de l'information codée grâce à de minuscules taches sombres et claires. Ça ne ressemble à aucun objet tridimensionnel réel. Au microscope, tout ce qu'on peut voir est un bruit¹ optique aléatoire, quelque chose comme ceci :



Les objets du monde tridimensionnel ont été désassemblés et reconstitués dans ce qui apparaît comme étant une configuration

1. Le terme *bruit* employé dans ce contexte ne renvoie pas au son. Il indique la présence d'information non structurée, aléatoire, comme la « neige »* de l'écran d'une télévision défectueuse.

* *White noise*, « bruit blanc » dans le texte original. Le *bruit blanc* est une expression construite par analogie avec la *lumière blanche* qui contient toutes les fréquences lumineuses à la même intensité. (N.d.T.)

bidimensionnelle complètement brouillée. Ce n'est qu'au moyen de ce brouillage qu'une partie du monde tridimensionnel peut être représentée sur une surface bidimensionnelle.

Vous pouvez « débrouiller » tout cela, mais seulement si vous connaissez le truc. L'information est présente sur la pellicule et peut être reconstituée. Une lumière braquée sur le motif brouillé sera dispersée et se reconstruira comme une image tridimensionnelle réaliste flottant librement.



La réalité fantomatique d'une image holographique peut être regardée sous n'importe quel angle et paraît palpable. Avec la technologie appropriée, Ptolémée aurait pu revêtir les murs de sa bibliothèque avec des pixels contenant une image holographique de milliers de rouleaux de parchemins. Éclairés par une lumière appropriée, ces rouleaux seraient apparus comme des images tridimensionnelles à l'intérieur de sa bibliothèque.

Vous vous rendez probablement compte que je vous entraîne dans de très étranges territoires mais tout cela n'est qu'une partie du processus de reprogrammation auquel la physique doit une nouvelle fois se livrer. Ainsi, telle est la conclusion à laquelle 't Hooft et moi-même étions parvenus : le monde tridimensionnel de la réalité ordinaire – l'univers rempli de galaxies, d'étoiles, de planètes, de maisons, de pierres et de personnes – est un hologramme, une représentation de la réalité codée sur une surface bidimensionnelle éloignée. Cette nouvelle loi de la physique, connue sous le nom de principe holographique, affirme que ce qui est contenu dans toute portion de l'espace peut être décrit par des bits d'information limités au bord de cette dernière.

Pour rendre les choses plus concrètes, considérons la pièce dans laquelle je travaille. Je suis sur ma chaise, avec l'ordinateur

devant moi, pendant que mon bureau est tout encombré de piles de papiers que j'ai peur de jeter – une telle quantité d'information ! Tout cela est précisément codé à l'échelle de Planck en bits beaucoup trop petits pour être vus mais bien serrés sur les murs de la pièce. Ou alors pensez à tout ce qu'il y a dans un rayon d'un million d'années-lumière à partir du Soleil. Cette portion de l'espace a aussi un bord – pas des murs physiques mais une coquille mathématique imaginaire – qui contient tout cela : gaz interstellaire, étoiles, planètes, personnes et tout le reste. Comme tout à l'heure, tout ce qui se trouve à l'intérieur de cette gigantesque coquille est l'image de bits microscopiques répartis dessus. De plus, le nombre de bits nécessaires est d'au moins un par aire de Planck. Tout se passe comme si le bord – murs d'un bureau ou coquille mathématique – était fait de minuscules pixels, chacun occupant une longueur de Planck au carré, tout ce qui se trouve à l'intérieur de la région ainsi délimitée étant une image holographique de son bord pixélisé. Mais, comme dans le cas d'un hologramme ordinaire, l'information codée sur le bord distant est une représentation très brouillée de l'original tridimensionnel.

Le principe holographique est une révision choquante de ce à quoi nous avons été accoutumés. Que l'information soit répartie à travers le *volume* de l'espace nous semble si intuitif qu'il nous est difficile de penser que cela puisse être faux. Mais le monde n'est pas voxélisé : il est pixélisé et toute l'information est emmagasinée sur le bord de l'espace. Mais quel bord et de quel espace ?

Au chapitre 7, j'ai posé la question suivante : où se trouve l'information disant que Grant est enterré dans la tombe de Grant ? Après avoir éliminé quelques réponses erronées, j'avais conclu que l'information se trouvait dans la tombe de Grant. Mais en est-il vraiment ainsi ? Commençons par la portion d'espace contenue dans le cercueil de Grant. D'après le principe holographique, les restes de Grant sont une illusion holographique – une image reconstruite à partir de l'information stockée sur les parois du cercueil. Mais ces restes, et le cercueil lui-même, se trouvent à l'intérieur des murs de ce grand monument qu'on nomme tombeau de Grant.

Ainsi, les restes de Grant, comme ceux de son épouse Julia, les cercueils et les touristes qui viennent les voir sont tous des images d'une information conservée sur les murs du tombeau.

Mais pourquoi s'arrêter en si bon chemin ? Imaginez une sphère gigantesque entourant tout le système solaire. Grant, Julia,



les cercueils, les touristes, le tombeau, la Terre, le Soleil et les neuf planètes (car Pluton *est une planète*¹ !) : tout cela est codé par de l'information emmagasinée sur la grande sphère. Et cela continue ainsi, jusqu'à ce qu'on parvienne au bord de l'univers – ou à l'infini.

Il est évident que la question de la localisation d'un bit d'information précis n'a pas une seule réponse. La mécanique quantique ordinaire introduit une dose d'incertitude sur de telles questions. Jusqu'à ce qu'on observe une particule – pour ce dont nous parlons, c'est d'ailleurs vrai de n'importe quel autre objet –, il y a une incertitude quantique sur sa position. Mais une fois qu'on l'a observée, tout le monde sera d'accord pour dire où elle se trouve. S'il s'agit d'un atome du corps de Grant, la mécanique quantique ordinaire instillera une légère incertitude sur sa position mais ne le rejettera pas au bord de l'espace, ni même sur les parois de son cercueil. Alors, si la bonne question n'est pas de se demander où un bit d'information est situé, quelle est-elle ?

Dans nos efforts de précision – particulièrement quand nous nous appuyons à la fois sur la gravitation et la mécanique quan-

1. Il s'agit là d'une allusion au fait que, le 24 août 2006, la vingt-sixième assemblée générale de l'Union astronomique internationale qui se tenait à Prague a décidé que Pluton n'était plus une planète en révisant la définition. Il n'y a donc aujourd'hui que huit planètes dans notre système solaire – du moins jusqu'à ce qu'un prochain congrès en décide autrement... (N.d.T.)

tique –, nous parvenons à une représentation mathématique impliquant que des configurations de pixels dansent sur un écran bidimensionnel distant et qu'il faille un code secret pour traduire ces motifs brouillés par des images tridimensionnelles cohérentes. Mais il n'y a bien entendu aucun écran recouvert de pixels entourant chaque portion de l'espace. Le cercueil de Grant est une partie du tombeau de Grant, qui n'est qu'une partie du système solaire qui est contenue dans une sphère de taille galactique entourant la Voie lactée... jusqu'à ce que l'univers tout entier soit entouré. À chaque niveau, tout ce qui est à l'intérieur peut être décrit comme un hologramme mais, quand nous recherchons l'hologramme, il se trouve toujours au niveau supérieur¹.

Aussi étrange que soit le principe holographique – et il l'est particulièrement ! –, il est couramment admis en physique théorique. Il ne s'agit plus d'une spéculation sur la gravité quantique : il est devenu un outil de travail de tous les jours, fournissant des réponses non seulement sur la gravité quantique mais aussi sur des objets aussi prosaïques que les noyaux atomiques (voir chapitre 23).

Bien que le principe holographique soit une reconstruction brutale des lois de la physique, sa preuve ne nécessite pas des mathématiques sophistiquées. Commençons avec une portion sphérique de l'espace délimitée par un bord mathématique imaginaire. Cette portion contient de la « substance », n'importe quoi – de l'hydrogène, des photons, du fromage, du vin, ce que vous voulez – du moment que cela ne sort pas du bord. Je parlerai seulement de « substance ».

L'objet le plus massif qui peut être comprimé dans cette portion d'espace est un trou noir dont l'horizon coïncide avec le bord.

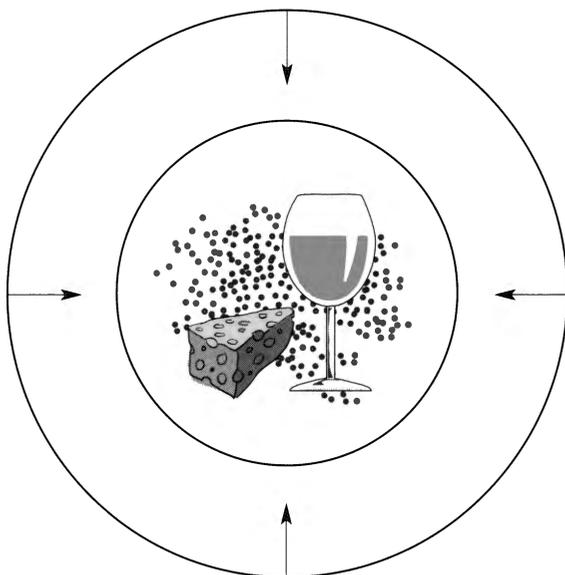
1. Le principe holographique fait naître d'étranges questions – des questions du genre de celles qu'on trouve dans *Amazing Stories* ou d'autres revues populaires de science-fiction des années 1950. « Notre univers est-il un avatar tridimensionnel de quelque monde pixelisé bidimensionnel, peut-être programmé par quelque ordinateur quantique cosmique ? » Plus excitant encore : « Les fanas d'informatique du futur pourront-ils simuler la réalité sur un écran de pixels quantiques et devenir les maîtres de leur propre univers ? » La réponse à chacune de ces questions est : oui, mais...

Bien sûr, il se pourrait que l'univers se trouve dans quelque ordinateur quantique futuriste, mais je ne vois pas en quoi le principe holographique apporte quoi que ce soit à une telle idée, sinon le fait que le nombre d'éléments de circuits pourrait bien être d'une certaine façon plus petit qu'on ne le croit. Il en faudrait 10^{180} pour remplir l'univers. Les bâtisseurs de monde du futur pourraient être soulagés qu'il ne leur faille, grâce au principe holographique, que 10^{120} pixels. (À titre de comparaison, un caméscope numérique en possède quelques millions.)

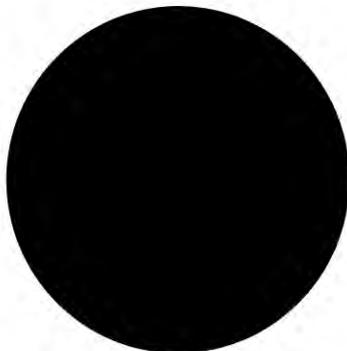


La substance ne peut pas être plus massive que cela sous peine de sortir du bord ; mais y a-t-il une limite au nombre de bits d'information contenue dans la substance ? C'est cela qui nous intéresse : déterminer le nombre maximal de bits qu'on peut fourrer dans la sphère.

Imaginons ensuite une coquille sphérique de matière – pas une coquille imaginaire mais une faite de vraie matière – entourant l'ensemble. La coquille, qui est faite de matière réelle, a sa propre masse. Quelle que soit sa composition, elle peut être comprimée, par pression extérieure ou par attraction gravitationnelle de la substance qui se trouve à l'intérieur, jusqu'à ce qu'elle épouse parfaitement le contour de la portion d'espace.



En adaptant la masse de la coquille, nous pouvons créer un horizon qui coïncide avec le bord de la portion d'espace.



La substance d'origine, celle avec laquelle nous avons commencé, avait une certaine quantité d'entropie – d'information cachée – dont nous ne précisons pas la valeur. Mais il n'y a aucun doute sur l'entropie *finale* : c'est l'entropie du trou noir – son aire exprimée en unités de Planck.

Pour achever la démonstration, il ne nous reste plus qu'à nous rappeler que la deuxième loi de la thermodynamique exige que l'entropie augmente toujours. Ainsi, l'entropie du trou noir doit être plus grande que l'entropie de la substance d'origine. En regroupant tout cela, nous avons prouvé quelque chose de stupéfiant : le nombre maximal de bits d'information qui peut remplir une portion d'espace est égal au nombre de pixels à l'échelle de Planck qui peuvent être stockés sur l'aire du bord. Implicitement, cela signifie qu'il y a une « description de bord » de tout ce qui prend place à l'intérieur d'une portion de l'espace. La surface du bord est un hologramme bidimensionnel de l'intérieur tridimensionnel. À mes yeux, c'est le meilleur type de démonstration : deux principes de base, une expérience de pensée et une conclusion d'une grande portée.

Il y a une autre façon de voir le principe holographique. Si le bord de la sphère est très grand, toute petite portion apparaîtra comme étant approximativement plane. Jadis, les gens étaient leurrés par la grande taille de la Terre et pensaient qu'elle était plate. Cas encore plus extrême, supposons que le bord soit une sphère d'un million d'années-lumière de diamètre. Vu d'un point à l'intérieur de la sphère, mais seulement à quelques années-lumière

du bord, la surface de la sphère paraît plate. Cela signifie que tout ce qui se trouve à l'intérieur à quelques années-lumière du bord peut être vu comme un hologramme sur une plaque de pixels plate.



Il ne faudrait évidemment pas que vous vous imaginiez que je suis en train de parler d'un hologramme ordinaire. Est-il besoin de dire que le grain d'un morceau de pellicule photo ordinaire est bien plus grossier qu'une plaque de pixels aux dimensions de Planck. Qui plus est, la nouvelle sorte d'hologramme peut changer avec le temps : c'est un hologramme cinématique.

Mais la principale différence est que l'hologramme est quantique. Il tremble et scintille avec l'incertitude d'un système quantique en sorte que l'image tridimensionnelle a des soubresauts quantiques. Nous sommes tous faits de bits soumis à des mouvements quantiques complexes mais, quand nous y regardons de près, nous les trouvons situés aux confins les plus éloignés de l'espace. Je ne sais pas si l'on peut trouver description du monde moins intuitive que celle-ci ! Nous enfoncer le principe holographique dans notre crâne collectif est probablement le plus grand défi que nous, physiciens, ayons eu depuis la découverte de la mécanique quantique.

D'une certaine façon, l'article de 't Hooft, qui précéda le mien de plusieurs mois, était largement passé inaperçu. C'était en partie

dû à son titre : « Réduction dimensionnelle en gravité quantique ». Il se trouve que l'expression « réduction dimensionnelle » fait partie du vocabulaire technique de la physique dans un sens tout à fait différent que ce que 't Hooft voulait dire. Je veillai à ce que mon article ne connaisse pas le même sort : je lui ai donné pour titre : « L'univers est un hologramme ».

Je commençai à l'écrire pendant mon voyage de retour. J'étais enthousiasmé par le principe holographique mais j'étais bien conscient qu'il serait très difficile d'en convaincre quiconque. L'univers est un hologramme ? J'entendais déjà les réactions sceptiques : « Il a été bon physicien, mais il est devenu complètement cinglé. »

La complémentarité du trou noir et le principe holographique, voilà le genre d'idées – comme, par exemple, l'existence des atomes – sur lesquelles physiciens et philosophes auraient pu ergoter pendant des siècles. Fabriquer et étudier un trou noir en laboratoire est au moins aussi difficile que pouvait l'être le fait de voir les atomes pour les Grecs de l'Antiquité. Mais il n'a pas fallu plus de cinq ans pour que s'établisse un consensus. Comment un tel changement de paradigme a-t-il pu s'opérer ? L'arme qui a mis un terme à la guerre a essentiellement été la rigueur des mathématiques de la théorie des cordes.

Quatrième partie
L'étreinte se referme

Arme de déduction massive

En fait, je n'aurais même pas qualifié la théorie des cordes de « théorie » mais plutôt de « modèle » ; même pas d'ailleurs : une simple intuition. Après tout, une théorie est supposée fournir des critères utilisables pour identifier ce qu'on veut décrire – dans notre cas, les particules élémentaires. On devrait, du moins en principe, être capable de formuler les règles de calcul des propriétés de ces dernières et d'effectuer des prévisions. Imaginez que je vous fournisse une chaise tout en vous expliquant qu'il y manque encore les pieds et que l'assise, le dossier et les accoudoirs ne devraient pas tarder à être livrés. Je ne sais pas trop ce que je vous aurai donné, mais peut-on vraiment parler de chaise ?

GERARD 'T HOOFT

Le principe holographique n'était à lui seul pas suffisant pour permettre de gagner la guerre du trou noir. Il n'était pas assez précis et manquait de fondements mathématiques solides. Les réactions furent sceptiques : l'univers, un hologramme ? On dirait de la science-fiction ! Le physicien fictif du futur Steve passant « de l'autre côté » pendant que l'empereur et le comte observent sa mort ? Spiritisme !

Qu'est-ce qui fait qu'une idée marginale, quelque chose qui est peut-être resté en sommeil pendant des années, voit brusquement la balance pencher en sa faveur ? En physique, cela se produit souvent sans crier gare. Quelque chose de capital autant que spectaculaire attire soudainement l'attention d'une masse critique de physiciens et, en peu de temps, le curieux, le fantastique, l'impensable devient commun.

C'est parfois le résultat d'une expérience. La théorie corpusculaire de la lumière d'Einstein a mis du temps à s'imposer, la plupart des physiciens pensant qu'un nouveau retournement réhabiliterait la théorie ondulatoire. Mais, en 1923, Arthur Compton produisit une diffusion de rayons X sur des atomes de carbone et montra que la configuration obtenue d'angles et d'énergie ne pouvait que provenir de particules en collision. Dix-huit ans s'étaient écoulés entre l'affirmation initiale d'Einstein et l'expérience de Compton mais, à partir de là, en quelques mois, la résistance à la théorie corpusculaire de la lumière s'évanouit.

Un résultat mathématique, particulièrement s'il est inattendu, peut être le catalyseur. Les bases du modèle standard remontent au milieu des années 1960 mais des arguments furent avancés – certains par ceux-là même qui étaient à l'origine de la théorie – disant que les fondements mathématiques de la théorie n'étaient pas solides. Puis, en 1971, un jeune étudiant inconnu mena à bien des calculs extrêmement complexes et sophistiqués et annonça que les experts se trompaient. L'étoile de cet étudiant inconnu – Gerard 't Hooft – se mit à briller au firmament des physiciens.

Un autre exemple de la façon dont les mathématiques peuvent faire pencher la balance en faveur d'une idée « dingue » est le calcul fait par Stephen Hawking de la température d'un trou noir. L'affirmation de Bekenstein disant que les trous noirs possèdent une entropie fut d'abord accueillie avec scepticisme, voire dérision, notamment par Hawking. Regardés rétrospectivement, les raisonnements de Bekenstein étaient brillants mais ils étaient, à ce moment-là, trop confus et approximatifs pour convaincre, d'autant qu'ils conduisaient à une conclusion absurde : les trous noirs s'évaporent. Ce furent les difficiles calculs techniques de Hawking qui ont fait passer le paradigme des trous noirs d'étoile froide et morte à celui d'un objet rayonnant sa chaleur interne.

Dans les événements cruciaux que je viens de décrire, il y a des points communs. Tout d'abord, ils ont constitué une surprise. Un résultat tout à fait inattendu, qu'il soit expérimental ou mathématique, est un facteur puissant pour attirer l'attention. Ensuite, dans le cas d'un résultat mathématique, plus il est technique, précis, non intuitif et difficile, plus il secoue tout le monde, faisant admettre la supériorité de la nouvelle façon de penser. Cela tient en partie à ce que, dans le cas de calculs complexes, les possibilités d'erreurs sont nombreuses. S'ils ont franchi ces écueils, il devient difficile de

les ignorer. Les calculs de 't Hooft comme ceux de Hawking possédaient cette qualité.

Enfin, on change de paradigme quand les nouvelles idées ouvrent clairement la voie à d'autres travaux. Les physiciens sont toujours à l'affût d'idées nouvelles sur lesquelles travailler et s'empareront de tout ce qui peut leur apporter de nouvelles pistes pour leurs propres travaux.

Il était indéniable que la complémentarité du trou noir et le principe holographique étaient surprenants, voire choquants. Mais ils ne possédaient pas par eux-mêmes les deux autres qualités, du moins pas encore. En 1994, une confirmation expérimentale du principe holographique paraissait totalement hors de question, de même qu'une démonstration mathématique convaincante. En fait, on ne se rendait pas compte qu'on était très proche des deux : en moins de deux ans, une théorie mathématique précise prit forme et, une décennie plus tard, il se pourrait bien qu'une fascinante confirmation expérimentale soit imminente¹. C'est la théorie des cordes qui a rendu les deux possibles.

Avant d'entrer dans les détails de la théorie des cordes, laissez-moi vous en donner une idée générale. Personne n'est certain que la théorie des cordes soit la bonne représentation de notre univers – et peut-être en sera-t-il ainsi pendant longtemps. Mais, pour notre propos, ce n'est pas ce qui compte le plus. Nous avons vraiment le sentiment que la théorie des cordes est une théorie mathématiquement solide dans un *certain* univers. Cette théorie s'appuie sur les principes de la mécanique quantique ; elle décrit un système de particules élémentaires semblables à celles qu'on trouve dans notre propre univers ; à la différence des autres théories (la théorie quantique des champs étant un exemple significatif), les objets matériels interagissent tous à l'aide de la gravitation. Plus important, la théorie des cordes inclut les trous noirs.

Comment pouvons-nous l'utiliser pour prouver quelque chose sur la nature si nous ne savons pas si c'est la bonne théorie ? Dans un certain nombre de situations, cela n'a pas d'importance. Nous considérons la théorie des cordes comme modèle d'un certain univers et calculons ensuite ou apportons les preuves mathématiques du fait que l'information est perdue, ou non, *dans cet univers-là*.

1. Voir chapitre 23.

Supposons que nous découvriions que l'information n'est pas perdue dans notre modèle mathématique. Une fois cela établi, nous pouvons regarder de plus près et trouver à quel endroit Hawking s'est trompé. Nous pouvons essayer de voir si la complémentarité du trou noir et le principe holographique sont justes dans la théorie des cordes. Si c'est le cas, cela ne prouve pas la justesse de la théorie des cordes mais que Hawking se trompait dans la mesure où il affirmait prouver que les trous noirs *doivent* détruire l'information dans *n'importe quel* univers.

Dans mes explications sur la théorie des cordes, j'en resterai au strict minimum. Pour plus de détails, vous pouvez vous reporter à de nombreux livres, parmi lesquels mon précédent ouvrage, *Le Paysage cosmique*, *L'Univers élégant*, de Brian Greene, et *Warped Passages*, de Lisa Randall¹. C'est presque accidentellement que la théorie des cordes a été découverte. Au départ, elle n'avait aucun rapport avec les trous noirs ou le lointain monde à l'échelle de Planck de la gravité quantique. Il s'agissait du monde plus prosaïque des hadrons. Le mot *hadron* n'appartient pas au vocabulaire de tous les jours que tout le monde connaît. Mais les hadrons font partie des particules les plus ordinaires, les plus largement étudiées de la nature. Protons et neutrons – les particules qui composent le noyau atomique – sont des hadrons, de même que leurs proches parents nommés mésons et les particules qu'on a nommées avec désinvolture *glueballs*. À leurs beaux jours, les hadrons étaient à la pointe des particules élémentaires de la physique mais, aujourd'hui, ils sont souvent relégués au rang de sujet démodé de la physique nucléaire. Nous verrons cependant au chapitre 23 se jouer « hadrons : le retour » grâce à un regain d'intérêt.

Élémentaire, mon cher Watson !

Il y a une vieille histoire à propos de deux mères juives qui se rencontrent au coin d'une rue de Brooklyn. L'une dit à l'autre : « Tu as dû apprendre que mon fils est aujourd'hui médecin.

1. *Le Paysage cosmique*, de Léonard Susskind, *op. cit.* *L'Univers élégant*, de Brian Greene, éd. Gallimard, 2005 (coll. Folio). *Warped Passages – Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions*, de Lisa Randall, éd. Harper Perennial (rééd. 2006) (*Chemins tordus – Démêler les mystères des dimensions cachées de l'univers*). (N.d.T.)

D'ailleurs, qu'est devenu le tien, celui qui avait tellement de mal en calcul ? » Et l'autre de répondre : « Ah oui, mon fils est professeur à Harvard en physique des particules élémentaires. » La première dame répond alors avec commisération : « Ma pauvre ! Je suis vraiment désolée d'apprendre qu'il n'a jamais pu avoir son diplôme en physique des particules supérieures. »

Qu'entendons-nous exactement par particules élémentaires et que serait le contraire ? La réponse la plus simple est qu'une particule est élémentaire si elle est trop petite et trop simple pour pouvoir être démontée en morceaux plus petits. Le contraire ne serait pas particule supérieure mais particule composée, c'est-à-dire faite de morceaux plus petits, plus simples.

Le réductionnisme est la conception scientifique qui met sur le même plan compréhension et décomposition en éléments plus petits. Jusqu'ici, ça fonctionnait très bien. Les molécules sont composées d'atomes. À leur tour, ces derniers sont des assemblages d'électrons chargés négativement tournant autour d'un noyau central positif ; ce dernier se révèle être une boule formée de nucléons qui, en fin de compte, sont chacun faits de trois quarks. Aujourd'hui, tous les physiciens s'accordent sur le fait que molécules, atomes, noyaux et nucléons sont composés.

Mais, à un moment ou un autre, chacun de ces objets a été regardé comme étant élémentaire. En fait, le mot *atome* nous vient du grec indivisible et a été utilisé pendant environ deux mille cinq cents ans. Plus récemment, quand Ernest Rutherford découvrit le noyau atomique, ce dernier paraissait si petit qu'il aurait aussi bien pu n'être qu'un point. À l'évidence, ce qu'une génération considère comme élémentaire peut devenir composé pour celles qui suivent.

Tout cela amène la question : qui décide, pour le moment au moins, si une particule est élémentaire ou composée ? Voici une réponse possible : prenez-en deux, cognez-les entre elles, vraiment violemment, et regardez si quelque chose en ressort. S'il y a quelque chose, c'est que cela devait se trouver à l'intérieur de l'une des particules d'origine. Et, en effet, quand deux électrons très rapides entrent en collision avec un bon paquet d'énergie, tout un tas de trucs giclent partout. Il y aura surtout des photons, des électrons et des positrons¹. Si la collision est très violente, des protons

1. Les positrons sont les particules d'antimatière jumelles des électrons. Ils possèdent exactement la même masse que ceux-ci mais ont une charge électrique opposée : celle des électrons est négative, celle des positrons positive.

et des neutrons, aussi bien que leurs antiparticules¹, jailliront. Et, pour couronner le tout, de temps en temps c'est un atome complet qui peut apparaître. Cela signifie-t-il que les électrons sont faits d'atomes ? Bien sûr que non ! Faire entrer en collision des objets avec une grande énergie peut aider à comprendre les propriétés des particules mais ce qui en ressort n'est pas forcément un guide sûr pour comprendre de quoi elles sont composées.

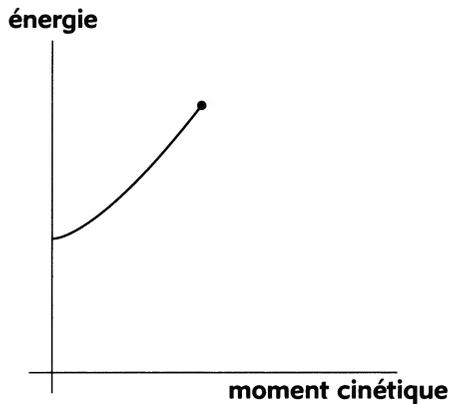
Voici une meilleure façon de voir si quelque chose est composé de parties. Commençons par un objet dont il est évident qu'il est composé – une pierre, un ballon de basket, un morceau de pâte à pizza. Il y a bien des épreuves qu'on peut faire subir à un tel objet : le comprimer, le déformer, ou encore le faire tourner autour d'un axe. Comprimer, tordre ou faire tourner un objet demande de l'énergie. Par exemple, un ballon de basket qui tourne possède de l'énergie cinétique ; plus vite il tourne, plus grande est cette énergie. Puisque énergie et masse sont équivalentes, la balle en rotation rapide a une plus grande masse. On dispose d'un bon instrument de mesure de cette rotation – une grandeur qui combine la vitesse de rotation de la balle, sa taille et sa masse – avec ce qu'on appelle *moment cinétique*. À mesure que le moment cinétique de la balle augmente, celle-ci gagne en énergie. Le graphique ci-contre montre la façon dont l'énergie d'un ballon de basket tournant augmente.

Pourquoi donc la courbe s'interrompt-elle brutalement ? La réponse est facile à comprendre. Il y a une limite à la résistance que la matière composant la balle (cuir ou caoutchouc) oppose à la tension : à un certain moment, elle finira par se déchirer à cause de la force centrifuge.

Imaginez maintenant une particule pas plus grande qu'un point de l'espace. Comment peut-on faire tourner un point mathématique autour d'un axe ? Est-ce que cela a seulement un sens ? Dans le même ordre d'idées, que voudrait dire le faire changer de forme ? La possibilité de faire tourner un objet ou de le déformer est un signe sûr qu'il est fait de parties plus petites – des parties qui peuvent se déplacer les unes par rapport aux autres.

On peut faire tourner les molécules et les atomes ; les noyaux aussi. Mais, dans le cas de ces boules de matière microscopiques,

1. Toute particule de matière a sa particule d'antimatière jumelle possédant une charge électrique de signe opposé et autres propriétés du même ordre. Il y a ainsi des antiprotons, des antineutrons et l'antiparticule de l'électron, le positron. Les quarks ne font pas exception : l'antiparticule d'un quark est appelée un antiquark.



Un ballon de basket en rotation

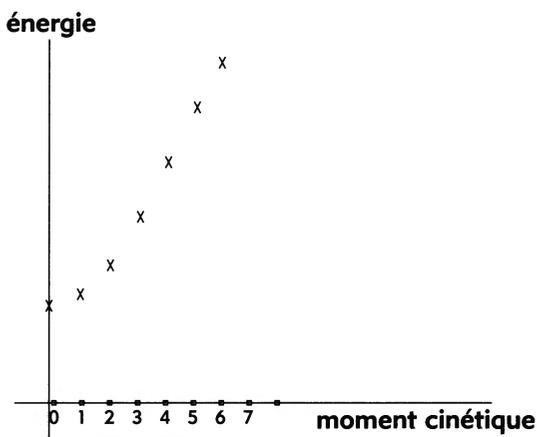
c'est la mécanique quantique qui joue le rôle principal. Comme pour les autres systèmes oscillants, énergie et moment cinétique ne peuvent être additionnés que par sauts discrets. Faire tourner un noyau n'est pas un processus consistant à accroître graduellement son énergie, cela ressemble plus à lui faire monter un escalier. La représentation graphique moment cinétique-énergie est une suite de points isolés¹.

En dehors du fait qu'il est constitué de sauts discrets, le graphique ressemble pas mal à celui du ballon de basket, y compris le fait qu'il s'arrête brutalement. Comme le ballon, il y a une limite à la résistance que le noyau peut opposer à la force centrifuge avant de voler en éclats.

Qu'en est-il des électrons ? Pouvons-nous les faire tourner ? Malgré tous nos efforts – et ils ont été considérables toutes ces années –, personne n'a jamais réussi à conférer à un électron un supplément de moment cinétique. Nous reviendrons sur le cas des électrons, mais commençons par reprendre celui des hadrons : protons, neutrons, mésons et glueballs.

Protons et neutrons sont très semblables. Ils ont presque la même masse et les forces qui les lient à l'intérieur du noyau sont pratiquement les mêmes. La seule différence importante est que le

1. Le spécialiste de physique mathématique italien Tullio Regge a été le premier à étudier les propriétés de tels graphiques. La suite de points est appelée trajectoire de Regge.



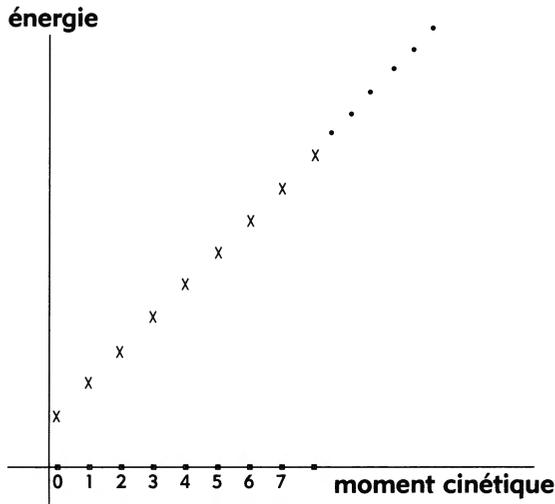
Un noyau en rotation

proton a une petite charge électrique positive tandis que le neutron, comme son nom l'indique, est électriquement neutre. Tout se passe presque comme si le neutron était un proton qui a perdu sa charge électrique. Ce sont ces ressemblances qui ont conduit les physiciens à les considérer, du point de vue du langage, comme un même objet : un nucléon. Un proton est un nucléon positif, tandis que le neutron est un nucléon neutre.

Dans les premiers temps de la physique nucléaire, on croyait qu'un nucléon – bien qu'il soit deux mille fois plus lourd qu'un électron – était aussi une particule élémentaire. Mais un nucléon est loin d'être aussi simple qu'un électron. Avec les progrès de la physique nucléaire, on commença à considérer que des objets cent mille fois plus petits qu'un atome n'étaient pas très petits. Alors qu'un électron est resté un point de l'espace – en tout cas, c'est tout ce qu'on peut en dire aujourd'hui –, on a montré qu'un nucléon possède toute une machinerie intérieure riche et complexe. Il apparaît que les nucléons ressemblent beaucoup moins aux électrons qu'aux noyaux, aux atomes, aux molécules : les protons et les neutrons sont des composés de beaucoup d'objets plus petits agglutinés. Nous le savons parce que nous pouvons les faire tourner et vibrer, ainsi que modifier leur forme.

Exactement comme pour un ballon de basket ou un noyau atomique, nous pouvons tracer un graphique représentant la rota-

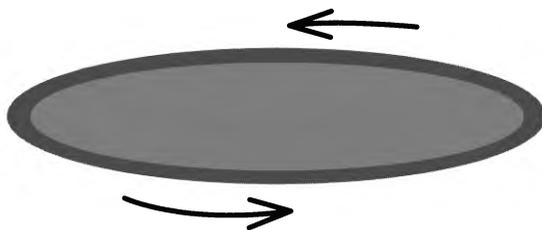
tion d'un nucléon, avec le moment cinétique sur l'axe horizontal et l'énergie sur l'axe vertical. La première fois que cela fut fait, il y a plus de quarante ans, le motif qui apparut était surprenant de simplicité : la suite des points se trouvait être presque exactement une *ligne droite*. Encore plus surprenant, elle ne semblait pas s'arrêter.



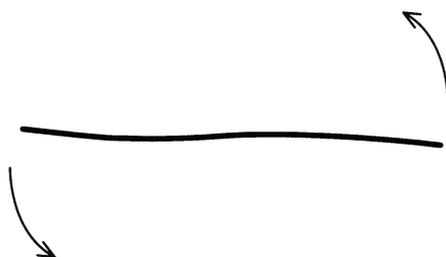
Un nucléon en rotation

Cette sorte de graphique comporte des indices sur la structure interne du nucléon. Deux caractéristiques remarquables sont très significatives pour qui sait déchiffrer ce message caché. Le simple fait que le nucléon puisse tourner autour d'un axe indique qu'il ne s'agit pas d'une particule ponctuelle : elle est faite de parties qui peuvent se mouvoir les unes par rapport aux autres. Mais il y a plus, bien plus. La suite de points ne s'interrompt pas brutalement mais semble se poursuivre indéfiniment, ce qui signifie que le nucléon ne vole pas en éclats quand il tourne trop vite. Ce qui assure la cohésion de ses différentes parties, quelle qu'en soit la nature, est beaucoup plus tenace que les forces qui assurent la cohésion du noyau.

Sans surprise, le nucléon s'allonge pendant qu'il tourne mais pas comme le ferait un morceau de pâte à pizza, c'est-à-dire en formant un disque plat.



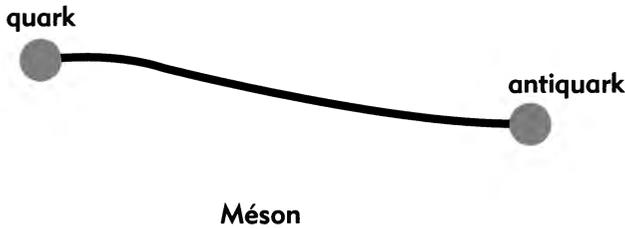
Le motif qu'on obtient pour un nucléon est une ligne droite, ce qui indique que celui-ci s'allonge pour former un objet long, fin, élastique, une sorte de corde.



Après un demi-siècle d'expérimentation sur les nucléons, on peut être certain qu'il s'agit de cordes élastiques qui peuvent s'étirer, tourner et vibrer quand elles sont excitées par un surcroît d'énergie. En fait, tous les hadrons peuvent tourner et devenir des objets longs comme des cordes. À l'évidence, ils sont tous faits du même truc poisseux, filiforme, étirable – un peu comme ce bubble-gum exaspérant qui s'acharne à ne pas partir. Richard Feynman a parlé des *partons* pour désigner les parties d'un nucléon mais ce sont les termes de Murray Gell-Mann – *quarks* et *gluons* – qui se sont imposés. *Gluon* renvoie à ce matériau collant qui forme de longues cordes et empêche les quarks de voler en éclats.

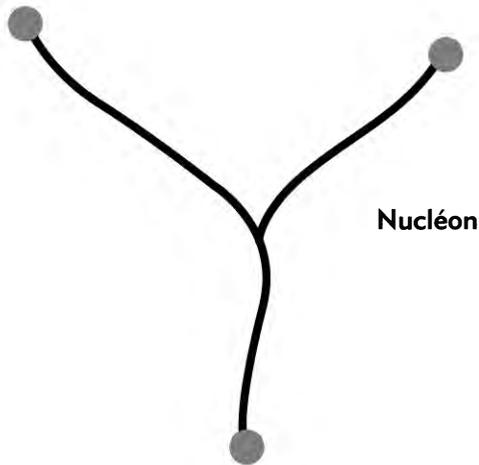
Les mésons sont les plus simples des hadrons. On en a découvert de nombreuses sortes qui toutes ont en commun une même structure : un quark et un antiquark reliés par une corde poisseuse.

Un méson peut vibrer comme un ressort, tourner autour d'un axe comme un bâton de majorette ou encore se tordre et frétiler d'un tas de manières. Les mésons sont des exemples de *cordes*



ouvertes, ce qui signifie qu'ils ont des extrémités, contrairement aux élastiques que nous appellerions *cordes fermées*.

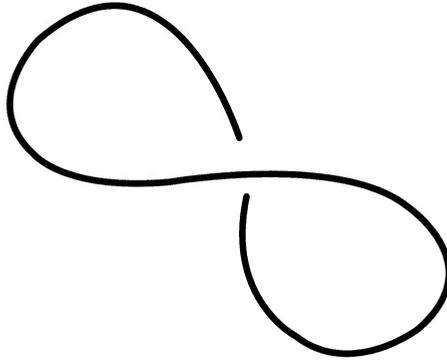
Un nucléon contient trois quarks, chacun d'eux étant rattaché à une corde, les trois cordes étant liées au centre comme le *bolo* d'un gaucho. Ils peuvent aussi tourner et vibrer.



La rotation rapide ou la vibration d'un hadron augmente l'énergie de la corde, l'allonge et augmente sa masse¹.

Il y a une autre sorte de hadron : une famille de particules « sans quark », faites seulement de cordes se refermant sur elles-mêmes en boucle. Les spécialistes des hadrons les appellent *glueballs* mais, pour un théoricien des cordes, ce sont simplement des *cordes fermées*.

1. Au début, les physiciens des particules ne se rendirent pas compte que de nombreux hadrons n'étaient que des nucléons ou des mésons en rotation ou en vibration. Ils pensaient avoir affaire à des particules nouvelles et distinctes. Les tables de particules élémentaires publiées dans les années 1960 comportent de longues listes qui épuisent plusieurs fois les lettres des alphabets grec et latin. Mais on a fini par se familiariser avec les « états excités » des hadrons et l'on y a vu ce qui s'y trouvait : des mésons et des nucléons en rotation et en vibration.



Glueball ou corde fermée

Il ne semble pas que les quarks soient faits de particules plus petites. Comme les électrons, ils sont si petits que leur taille est indécélable. Mais il est certain que les cordes qui lient les quarks sont composées d'autres objets qui ne sont pas des quarks. Les particules poisseuses qui se combinent pour former les cordes sont appelées gluons.

D'une certaine façon, les gluons sont de minuscules morceaux de corde. Bien qu'ils soient extrêmement petits, il semble néanmoins qu'ils aient deux « extrémités » – une positive et une négative –, quasiment comme s'il s'agissait de minuscules aimants¹.



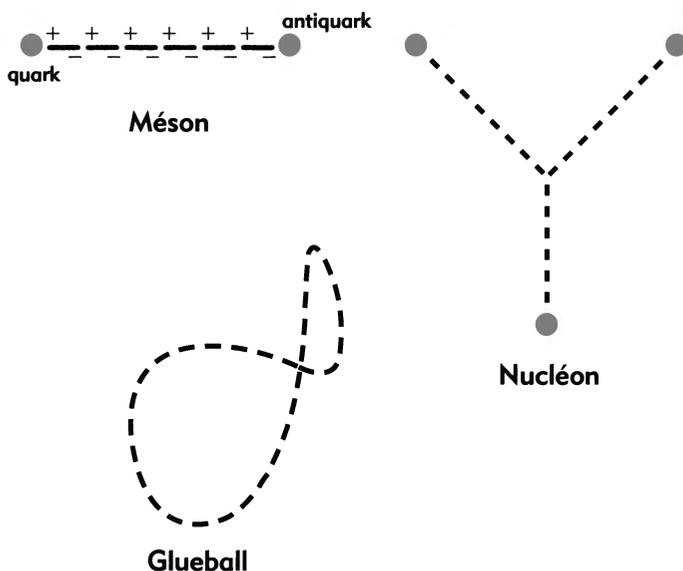
Gluon

La théorie mathématique des quarks et des gluons est appelée chromodynamique quantique (QCD), un nom qui laisse entendre qu'elle a plus à voir avec la photographie couleurs qu'avec les particules élémentaires. Cette terminologie deviendra plus claire sous peu.

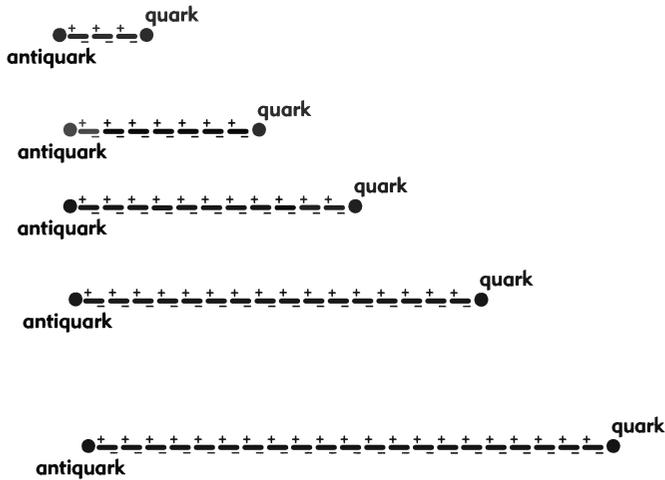
En suivant les règles mathématiques de la QCD, un gluon ne peut pas exister par lui-même. Ses extrémités positive et négative

1. Les deux extrémités d'un aimant sont couramment appelées pôle nord et pôle sud. Je ne voudrais pas laisser croire que les gluons s'alignent comme l'aiguille d'une boussole : c'est pourquoi je qualifierai les pôles d'un gluon de positif et négatif.

sont obligées, pour des raisons mathématiques, de se lier à d'autres gluons ou à des quarks : chaque extrémité positive doit être liée à l'extrémité négative d'un autre gluon ou à un quark ; chaque extrémité négative doit être liée à l'extrémité positive d'un autre gluon ou à un antiquark. Enfin, trois extrémités positives ou négatives peuvent se lier entre elles. Avec ces règles, on peut facilement assembler nucléons, mésons et glueballs.



Regardons maintenant ce qui se passe si, dans un méson, un quark est violemment heurté. Le quark commencera par s'éloigner rapidement de l'antiquark. Si les choses se passaient comme pour un électron à l'intérieur d'un atome, il s'échapperait : mais ce n'est pas du tout ce qui se passe dans notre cas. Pendant qu'il s'éloigne de son partenaire, des trous se forment entre les gluons, exactement comme ce qui se passe avec les molécules d'un élastique trop tendu. Mais, au lieu de casser net, les gluons se clonent, produisant davantage de gluons afin de combler les trous. Une corde se forme de cette façon entre quark et antiquark, ce qui fait échouer la tentative d'évasion du quark. La figure ci-dessous montre une succession d'états d'un quark animé d'une grande vitesse tentant de fuir son antiquark partenaire au sein d'un méson.



En fin de compte, le quark tombera en panne d'énergie, s'arrêtera et retournera vers l'antiquark. La même chose se produirait avec un quark animé d'une grande vitesse au sein d'un nucléon.

La théorie des cordes des nucléons, des mésons et des glueballs n'est pas une vaine spéculation. Elle a été très sérieusement confirmée au fil des ans et fait désormais partie de la théorie standard des hadrons. Ce qui n'est pas clair est de savoir si nous devrions voir dans la théorie des cordes une conséquence de la chromodynamique quantique – en d'autres termes, les cordes devraient-elles être considérées comme de longues chaînes de particules plus fondamentales, à savoir les gluons – ou si c'est l'inverse – c'est-à-dire que les gluons ne sont rien d'autre que de petits segments de corde. Les deux sont probablement vrais.

Il semble que les quarks soient aussi petits et élémentaires que les électrons. On ne peut pas les faire tourner, les comprimer ou les déformer. Mais, même s'ils donnent l'impression de ne pas contenir différentes parties, ils ont un degré de complexité qui paraît paradoxal. Il y a de nombreuses sortes de quarks avec des charges électriques et des masses différentes. Ce qui produit ces distinctions est un mystère : les rouages internes qui sous-tendent ces différences sont bien trop petits pour qu'on puisse les détecter. Voilà pourquoi nous les appelons élémentaires, pour l'instant en tout cas, et, tels des botanistes, leur donnons des noms différents.

Avant la Seconde Guerre mondiale, quand la physique était essentiellement une affaire européenne, les physiciens utilisaient le grec pour nommer les particules : *photon*, *électron*, *méson*, *baryon*, *lepton* et même *hadron* viennent du grec. Mais, ensuite, ce furent des Américains exubérants, irrévérencieux, voire carrément toqués qui prirent la relève et les noms en furent tout revigorés ! *Quark* est un mot dénué de sens qui vient du *Finnegans Wake* de James Joyce¹, mais les choses n'ont fait que dégringoler du haut des cimes de la littérature. C'est par un terme singulièrement inapproprié que l'on se réfère aux distinctions entre les différents types de quarks : la *saveur*... Nous pourrions parler de quarks au chocolat, à la fraise, à la vanille, à la pistache, à la cerise ou aux pépites de chocolat à la menthe, mais ce n'est pas le cas. Les six saveurs de quarks sont : *up*, *down*, *strange*, *charmed*, *bottom* et *top*. À un certain moment, *bottom* et *top* ont semblé trop osés et, pendant un temps, on les a remplacés par *beauty* et *truth*².

En vous parlant de la saveur, je voulais avant tout illustrer combien peu nous en savons en ce qui concerne les briques constitutives de la matière et à quel point peut être temporaire le fait pour nous de qualifier une particule d'*élémentaire*. Mais il y a une autre distinction qui joue un rôle vraiment très important dans la chromodynamique quantique. Chaque quark – *up*, *down*, *strange*, *charmed*, *top* et *bottom* – se présente en trois *couleurs* : rouge, bleu et vert. Voilà d'où vient le « chromo » de chromodynamique quantique.

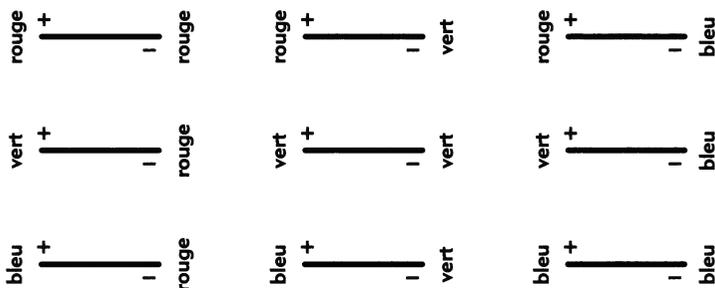
Ne vous y trompez pas. Les quarks sont bien entendu trop petits pour réfléchir la lumière au sens usuel. Colorer les quarks est à peine moins fou que parler de quark au chocolat, à la fraise ou à la vanille. Mais nous avons besoin de noms pour désigner les

1. Traduit en français sous le même titre aux éditions Gallimard par Philippe Lavergne (disponible dans la collection Folio). James Joyce a emprunté son titre à une chanson irlandaise du XIX^e siècle, *Finnegans Wake*. *Finnegans Wake*, mot à mot le réveil des Finnegans, peut être compris comme signifiant le réveil, ou la résurrection, des hommes. Pour ce qui concerne la raison pour laquelle Susskind cite le livre ici, nous reprendrons ce qu'en dit le site français de Wikipédia : « La phrase "Three quarks for Muster Mark" de *Finnegans Wake* (début du chapitre 4 du livre 2) est à l'origine de la dénomination des quarks en physique nucléaire. Cette phrase est chantée par un chœur d'oiseaux de mer et signifie probablement "trois acclamations [ou "trois railleries" d'après les notes de Joyce] pour M. Mark". » (*N.d.T.*)

2. En français, on distingue les quarks selon leur saveur soit en conservant la dénomination en anglais, soit en les traduisant respectivement par : haut, bas, étrange, charmé, beauté et vérité. (*N.d.T.*)

choses : parler de quarks rouges, verts ou bleus n'est pas plus ridicule que désigner les libéraux par les bleus et les conservateurs par les rouges. Nous ne comprenons peut-être pas l'origine de la couleur des quarks beaucoup mieux que celle de leur saveur, mais il se trouve que la couleur joue un rôle bien plus important en QCD.

Dans cette dernière, les gluons n'ont pas de saveur mais ils sont individuellement encore plus colorés que les quarks. Chaque gluon possède deux pôles, un positif et un négatif, et chaque pôle a une couleur : rouge, vert ou bleu. Dire qu'il y a neuf sortes de gluons est une simplification légèrement exagérée mais, pour l'essentiel, correcte¹.



Les neuf types de gluons

Pourquoi trois couleurs et pas deux, ou quatre, ou n'importe quel autre nombre ? Cela n'a rien à voir avec le fait que la vision des couleurs repose sur trois couleurs primaires. Ainsi que je l'ai déjà dit, les étiquettes de couleur sont arbitraires et n'ont aucun rapport avec les couleurs que vous et moi percevons. En fait, personne ne sait très bien pourquoi trois : c'est l'un de ces mystères qui nous signalent que nous sommes loin de comprendre entièrement les particules élémentaires. Mais, de par la façon dont elles se combinent à l'intérieur des nucléons et des mésons, nous savons qu'il y a trois, et seulement trois, couleurs pour les quarks.

Il me faut faire un aveu. Bien que j'aie travaillé en physique des particules élémentaires pendant plus de quarante ans, je ne les aime pas beaucoup. C'est vraiment trop compliqué : six saveurs,

1. Les experts qui liront ceci remarqueront qu'il y a *seulement* huit types distincts de gluons. Une combinaison quantique – le gluon ayant une probabilité égale d'être rouge-rouge, bleu-bleu et vert-vert – est redondante.

trois couleurs, des dizaines de constantes numériques arbitraires : on est bien loin de la simplicité et de l'élégance. Alors pourquoi persister ? La raison – et je suis sûr de ne pas être le seul à penser ainsi – en est que cette complication même est un indice qu'il y a quelque chose derrière tout cela dans la nature. Il est difficile de croire que des particules infinitésimales ponctuelles puissent posséder tant de propriétés et de structures. À un niveau pas encore découvert, il y a sûrement toute une machinerie sous-jacente à ces particules prétendument élémentaires. C'est la curiosité à propos de ces mécanismes cachés autant que leurs implications sur les principes de base de la nature qui m'incitent à m'aventurer dans l'épouvantable marécage des particules de la physique.

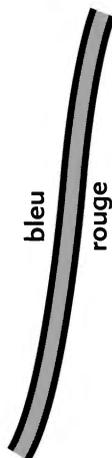
En même temps qu'on a avancé dans la connaissance des particules, les quarks sont devenus bien connus d'un large public. Mais, si je devais parier sur la particule qui dénote le mieux les mécanismes cachés, je miserais sur les gluons. Que peuvent bien chercher à nous dire cette paire d'extrémités gluantes, l'une positive, l'autre négative ?

Au chapitre 4, j'ai expliqué que la théorie quantique des champs ne se ramène pas à une liste de particules. Les deux autres ingrédients sont les propagateurs – les lignes d'univers représentant le mouvement d'une particule d'un point de l'espace-temps à un autre – et les vertex. Commençons par les propagateurs. Du fait que les gluons possèdent deux pôles, chacun doté d'une couleur, il est fréquent que les physiciens traquent les lignes d'univers comme des lignes doubles. Pour indiquer un type particulier de gluon, nous pourrions écrire les couleurs juste à côté de chacune des lignes¹ (voir page suivante).

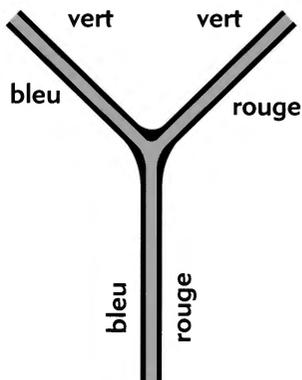
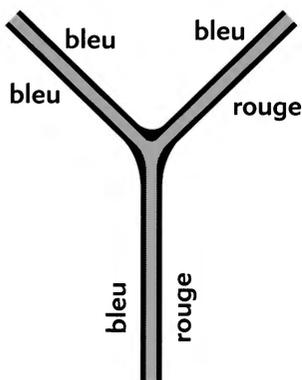
Le dernier ingrédient présent dans la théorie quantique des champs est la liste de vertex. Le plus important pour nous est celui qui décrit un unique gluon se scindant en deux². Le motif est plutôt simple : quand un gluon avec ses deux extrémités se scinde, deux

1. Pour certains de mes collègues, le prétendu propagateur à lignes doubles n'est qu'une astuce pour pister les possibilités mathématiques. Pour d'autres, y compris moi-même, il s'agit d'un indice profond de l'existence de quelque structure microscopique qui, pour l'instant, est simplement trop petite pour qu'on puisse la détecter.

2. Vous vous demandez peut-être comment nous pouvons savoir que les gluons peuvent se scinder en paires de gluons. La réponse est profondément enfouie dans les mathématiques de la QCD. Selon les règles mathématiques de la théorie quantique des champs, les gluons ne peuvent faire qu'une seule chose parmi deux : se scinder en deux ou émettre une paire de quarks. En fait, ils peuvent faire les deux.



nouvelles extrémités doivent apparaître. Selon les règles mathématiques de la QCD, les nouvelles extrémités doivent toutes deux posséder la même couleur. Voici deux exemples : en lisant du bas vers le haut, le premier représente un gluon bleu-rouge se scindant en bleu-bleu et bleu-rouge. Le second représente un gluon bleu-rouge se scindant en bleu-vert et vert-rouge.



Il serait possible de renverser ces vertex et représenter ainsi comment deux gluons peuvent se fondre en un gluon unique.

Même si ce n'est pas évident – le comprendre pleinement prend un certain temps – les gluons ont une forte propension à s'agglutiner et former ainsi de longues chaînes : extrémité positive avec extrémité négative, rouge avec rouge, bleu avec bleu et vert avec

vert. Ces chaînes sont les cordes qui lient les quarks et donnent aux hadrons leurs propriétés longilignes.

Des cordes dans les fondations

L'idée de cordes élastiques réapparaît dans l'étude de la gravité quantique, à ceci près que tout y est plus petit et plus rapide, environ d'un facteur 10^{20} . Ces filets d'énergie miniature, rapides et terriblement puissants sont appelés *cordes fondamentales*¹.

Je vais réexpliquer les choses pour qu'il n'y ait aucune confusion dans la suite. La théorie des cordes a deux applications très différentes en physique moderne. En l'appliquant aux hadrons, on se situe sur une échelle de tailles qui paraissent minuscules d'après les normes humaines usuelles mais sont gigantesques du point de vue de la physique moderne. C'est un fait admis que les trois types de hadrons – les nucléons, les mésons et les glueballs – sont des objets semblables à des cordes décrits par les mathématiques de la théorie des cordes. Les expériences de laboratoire qui étayent la théorie des cordes hadroniques remontent à près d'un demi-siècle. Les cordes qui lient les hadrons, et sont elles-mêmes faites de gluons, sont appelées *cordes QCD*. Les cordes fondamentales – celles qui sont associées à la gravité et à la physique se situant quelque part près de l'échelle de Planck – sont celles qui ont récemment suscité tout cet enthousiasme, ces controverses, ces blogs vengeurs et autres livres polémiques.

Les cordes fondamentales peuvent être aussi petites par rapport à un proton qu'un proton l'est par rapport à l'État du New Jersey. Parmi elles, le graviton vient en tout premier.

Les forces gravitationnelles ressemblent beaucoup aux forces électriques par bien des aspects. La loi qui décrit la force s'exerçant entre des particules chargées est appelée loi de Coulomb. Celle qui décrit les forces de gravité est appelée loi de Newton. Dans les deux cas, il s'agit de forces suivant des lois en $1/r^2$, ce qui signifie que l'intensité de la force décroît en raison inverse du carré de la distance r . En doublant la distance entre les particules, on

1. Il y a un débat pour savoir si les cordes fondamentales sont l'explication ultime des particules élémentaires ou si elles ne sont qu'une étape de plus dans la marche du réductionnisme vers des choses plus petites. Quelle que soit l'origine du terme, *cordes fondamentales* est désormais utilisé par commodité.

divise par quatre l'intensité de la force. En triplant la distance, on divise la force par neuf. En la quadruplant, on divise par seize, et ainsi de suite. La force de Coulomb qui s'exerce entre deux particules est proportionnelle au produit de leurs charges électriques ; celle de Newton est proportionnelle au produit de leurs masses. Il y a des similitudes, mais aussi des différences : les forces électriques peuvent être répulsives (entre charges de même signe) ou attractives (entre charges de signes opposés) tandis que la gravité est toujours attractive.

Une ressemblance importante est que les deux types de forces peuvent engendrer des ondes. Considérez ce qui advient à la force qui s'exerce entre deux particules chargées distantes quand l'une d'elles est brusquement déplacée – disons en l'éloignant de l'autre charge. On pourrait croire que la force qui s'exerce sur la seconde particule change instantanément quand on déplace la première. Mais il y a quelque chose qui cloche dans un tel tableau. Si la force qui s'exerce sur une charge distante pouvait vraiment changer subitement, sans délai, nous pourrions utiliser cela pour envoyer des messages instantanés à un endroit distant de l'espace. Mais l'instantanéité d'un message viole un des principes les plus profonds de la nature : selon la théorie de la relativité restreinte, aucun signal ne peut se déplacer plus vite que la lumière. On ne peut pas envoyer un message qui mettrait moins de temps que ne le ferait la lumière.

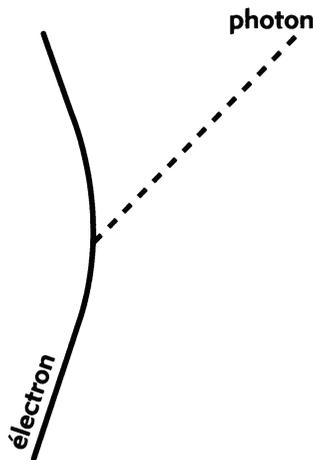
En fait, la force qui s'exerce sur une particule distante ne change pas instantanément quand une particule proche est soudainement déplacée. Au lieu de cela, une perturbation se déploie (à la vitesse de la lumière) à partir de la particule déplacée. La force qui s'exerce sur la particule distante n'est modifiée que lorsque la perturbation l'atteint. La perturbation ressemble à une onde oscillante. Lorsque l'onde finit par arriver, elle secoue l'autre particule, la contraignant à se comporter comme un bouchon agité par une vague dans un étang.

Dans le cas de la gravité, la situation est analogue. Imaginons qu'une main géante secoue le Soleil. Le mouvement du Soleil ne se ressentira pas sur Terre avant huit minutes, le temps qu'il faut à la lumière pour aller du premier à la seconde. Le « message » se déploie – là encore à la vitesse de la lumière – sous la forme d'une *ride de courbure* ou *onde gravitationnelle*. Les ondes gravitationnelles sont aux masses ce que les ondes électromagnétiques sont aux charges électriques.

Ajoutons à tout cela une pincée de théorie quantique. Nous savons que l'énergie des ondes électromagnétiques oscillantes parvient sous la forme de quanta indivisibles appelés photons. Planck et Einstein avaient de solides raisons de penser que l'énergie oscillante parvient en unités discrètes et, sauf grosse erreur de notre part, les mêmes arguments s'appliquent aux ondes gravitationnelles. Les quanta du champ gravitationnel sont appelés gravitons.

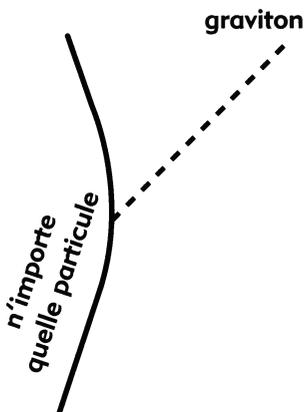
Je devrais dire que l'existence des gravitons, contrairement à celle des photons, est une conjecture non vérifiée expérimentalement – de celles dont la plupart des physiciens pensent qu'elle s'appuie sur des principes solides mais n'en reste pas moins une conjecture. Malgré cela, la logique qui sous-tend l'existence des gravitons s'impose à la plupart des physiciens qui y ont réfléchi.

La similitude entre photons et gravitons fait surgir d'intéressantes questions. Le rayonnement électromagnétique est expliqué, en théorie quantique des champs, par un diagramme vertex dans lequel une particule chargée, par exemple un électron, émet un photon.



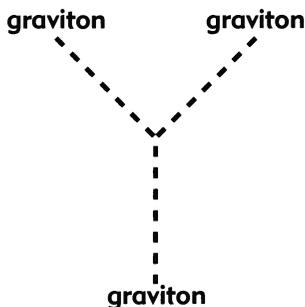
Vertex d'émission d'un photon

On s'attend naturellement à ce que les ondes gravitationnelles apparaissent quand des particules émettent des gravitons. Dans la mesure où tout a une masse, toute particule doit pouvoir émettre des gravitons.



Vertex d'émission d'un graviton

Même un graviton peut émettre un graviton.



Malheureusement, inclure les gravitons dans les diagrammes de Feynman conduit à une débâcle mathématique. Depuis presque un demi-siècle, les théoriciens de la physique ont tenté de faire tenir debout une théorie quantique des champs des gravitons et les échecs répétés ont convaincu beaucoup d'entre nous que c'était là mission impossible.

Ce qui ne va pas en théorie quantique des champs

Un des incidents les plus marquants lors de mon voyage à Cambridge en 1994 fut le repas que nous prîmes avec mon ami Sir

Roger Penrose. Sir Roger venait de devenir Sir Roger aussi Anne et moi nous rendîmes à Oxford pour le féliciter.

Tous les quatre – Roger, moi-même et nos épouses – étions installés sur les berges de la Cherwell dans un agréable restaurant à l'extérieur de la ville à regarder passer les adeptes du *punting*. Pour le cas où vous ne seriez pas coutumier de ce sport, il s'agit d'une forme très distinguée de canotage où l'on déplace le bateau sans se presser en poussant sur une longue perche. C'est là une occupation bucolique qui m'a toujours fait penser au *Déjeuner des canotiers* de Renoir. Mais elle comporte ses risques. Un bateau passait avec un groupe d'étudiants en train de faire la fête et de chanter ; la jolie fille qui maniait la perche la bloqua dans la vase. Se refusant à l'abandonner, elle assura le spectacle, s'accrochant désespérément à la perche pendant que le bateau s'éloignait en glissant.

Pendant ce temps, nous étions absorbés par notre dessert : une unique mousse au chocolat que nous partagions. Ces dames en avaient terminé avec leur part tandis que Roger et moi, tout en riant de la batelière coincée – qui en riait d'ailleurs elle-même –, nous escrimions sur les restes de chocolat noir délicieux. Je remarquai avec un certain intérêt que nous alternions les coups de fourchette, chacun coupant en deux le morceau restant. Roger le remarqua aussi et c'est ainsi que commença le concours de celui qui réussirait à couper en deux le dernier.

Roger fit la remarque que les Grecs s'étaient déjà demandé si la matière était divisible à l'infini ou s'il y avait, pour chaque substance, une plus petite portion indivisible : c'est ce qu'ils appelaient atomes. Je lançai : « Crois-tu qu'il y a des atomes de chocolat ? » Roger répondit ne pas se rappeler si le chocolat figurait dans la classification périodique des éléments simples. Quoi qu'il en soit, nous achevâmes notre partage sur ce qui semblait être le plus petit atome de chocolat – et, si je me souviens bien, c'est à Roger qu'il échut. L'incident de *punting* se termina bien lui aussi avec l'arrivée du bateau suivant.

Le problème avec la théorie quantique des champs est qu'elle s'appuie sur l'idée que l'espace (et l'espace-temps) est comme une mousse au chocolat divisible à l'infini. Peu importe la finesse de vos tranches, vous pouvez toujours continuer à la diviser. Tous les grands casse-tête mathématiques tournent autour de l'infini : comment la suite des nombres se déroule-t-elle sans fin, et comment pourrait-il en

être autrement ? De quelle façon l'espace peut-il être divisé indéfiniment, mais que signifierait le contraire ? Je soupçonne que l'infini a été une des premières causes de folie chez les mathématiciens.

Folie ou non, un espace indéfiniment divisible est ce que les mathématiciens appellent un *continuum*. Le problème du continuum, c'est qu'un nombre effrayant de choses peuvent s'entasser sur les plus petites distances. D'ailleurs, il n'y a pas de plus petite distance dans un continuum : on peut s'évanouir en une régression infinie de cellules de plus en plus petites, les choses peuvent s'insérer à chaque niveau. Pour le dire autrement, un continuum peut receler un nombre infini de bits d'information dans tout volume, aussi minuscule soit-il.

Mais l'infiniment petit est tout particulièrement cause de désordre en mécanique quantique où tout ce qui peut tressauter tressaute et où « tout ce qui n'est pas interdit est obligatoire »¹... Même au zéro absolu dans le vide, les champs, par exemple électrique et magnétique, fluctuent et cela à toutes les échelles : depuis les plus grandes longueurs d'onde de plusieurs milliards d'années-lumière en descendant jusqu'à celles dont la taille ne dépasse pas celle d'un point mathématique. Ce soubresaut des champs quantiques peut emmagasiner une infinité d'information dans tout volume minuscule. Telle est la recette d'une catastrophe mathématique.

Le nombre potentiellement infini de bits dans toute petite portion d'espace apparaît dans un diagramme de Feynman comme une régression infinie de sous-diagrammes de plus en plus petits. Commençons par une idée simple : celle d'un propagateur illustrant le mouvement d'un électron d'un point de l'espace-temps à un autre. Au début et à la fin, il y a un simple électron.

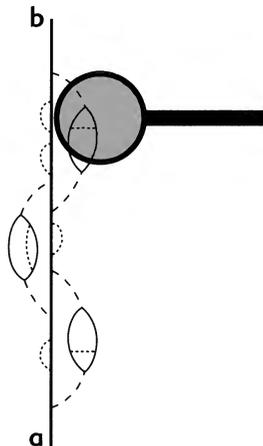


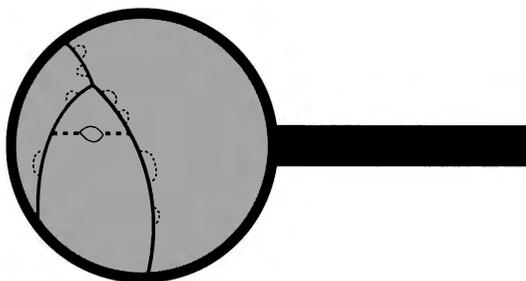
1. Voir p. 123. (N.d.T.)

Un électron peut emprunter d'autres chemins pour aller de a à b – par exemple en jonglant avec des photons tout du long.



À l'évidence, les possibilités sont sans fin et, d'après les règles de Feynman, il faut toutes les additionner pour obtenir la probabilité finale. Chaque diagramme peut être orné avec davantage de structures. Chaque propagateur, chaque vertex peut être remplacé par quelque chose de plus compliqué renfermant des diagrammes dans des diagrammes dans des diagrammes... jusqu'à ce qu'ils soient trop petits pour qu'on puisse seulement les voir. Mais, grâce à une loupe superpuissante, même les structures les plus fines peuvent être ajoutées, indéfiniment.





Cette possibilité d'ajouter à l'infini des structures toujours plus petites à un diagramme de Feynman est une des conséquences troublantes du continuum espace-temps de la théorie quantique des champs : de la mousse au chocolat, tout du long.

Avec tout cela, il n'est guère surprenant que la théorie quantique des champs soit un sujet mathématiquement dangereux. Faire en sorte que des cellules d'espace infinitésimales en nombre infini s'assemblent pour former un univers cohérent n'est pas chose aisée. En fait, l'essentiel de la théorie quantique des champs déraile et mène à des aberrations. Même le modèle standard des particules élémentaires pourrait bien, en dernière analyse, ne pas être mathématiquement consistant.

Mais cela n'est rien comparé aux difficultés auxquelles on se heurte en essayant de construire une théorie quantique des champs de la gravitation. Souvenez-vous : la gravitation, c'est de la géométrie. En essayant de combiner la relativité générale et la mécanique quantique, ou du moins d'ajuster les règles de la théorie quantique des champs, on obtient que l'espace-temps lui-même change constamment de forme. Si l'on pouvait zoomer sur une minuscule portion de l'espace, on observerait un espace se secouant violemment, se retournant sur lui-même en infimes bosses et nœuds de courbure. Pis, plus vous zoomez, plus violentes seront les fluctuations. L'hypothétique diagramme de Feynman impliquant des gravitons reflète cette perversion. L'infinité des diagrammes de plus en plus petits échappe frénétiquement à tout contrôle. Toute tentative de faire tenir debout une théorie quantique des champs de la gravitation conduit au même point : trop de choses se passent aux plus petites échelles de distance. Appliquer les méthodes conventionnelles de la théorie quantique des champs à la gravitation mène à un fiasco mathématique.

Les physiciens ont un moyen de mettre de côté la catastrophe de l'espace indéfiniment divisible : ils font comme si l'espace, comme une mousse au chocolat, n'était pas vraiment un continuum. On suppose que, en divisant l'espace, passé un certain point, on rencontre un noyau qu'on ne peut plus diviser. Dit autrement : on arrête de dessiner des diagrammes de Feynman sitôt que les structures sont trop petites. Une telle limitation dans la petitesse des choses est appelée un *cutoff*, un point limite. Au fond, un *cutoff* n'est rien d'autre que le fait de découper l'espace en voxels indivisibles et de ne jamais autoriser plus d'un bit par voxel.

Ce point limite a tout d'un faux-fuyant, mais nous avons une excuse : cela fait longtemps que les physiciens ont supposé que la longueur de Planck est l'ultime atome d'espace. Les diagrammes de Feynman, y compris ceux qui mettent en jeu des gravitons, sont parfaitement sensés dès lors qu'on cesse d'ajouter des structures plus petites que la longueur de Planck – ou à peu près, le débat reste ouvert. C'était ce que pratiquement tout le monde attendait de l'espace-temps : qu'il possède, à l'échelle de Planck, une structure indivisible, granulaire, voxélisée.

Mais cela, c'était avant la découverte du principe holographique. Comme nous l'avons vu au chapitre 18, remplacer l'espace continu par un ensemble de voxels finis à l'échelle de Planck n'est pas la bonne idée. Voxéliser l'espace surestime grandement la variation totale qui peut se produire dans une zone. Cela aurait conduit Ptolémée à une conclusion erronée sur la quantité de bits que sa bibliothèque pouvait contenir et cela conduirait de même les théoriciens de la physique à se tromper sur l'information totale qu'on peut stocker dans une région de l'espace.

C'est pratiquement dès le début qu'on a apprécié le fait que la théorie des cordes résolvait le mystère des diagrammes de Feynman infiniment petits. Elle le fait en partie en éliminant l'idée d'une particule infiniment petite. Mais, jusqu'à l'introduction du principe holographique, on ne mesurait pas à quel point la théorie des cordes est radicalement différente d'une version « *cutoff* » ou voxélisée de la théorie quantique des champs. Le fait remarquable est que la théorie des cordes est fondamentalement une théorie holographique décrivant un univers pixélisé.

La théorie des cordes moderne, tout comme ses moutures plus anciennes, met en œuvre des cordes ouvertes et des cordes fermées. Dans la plupart des variantes de la théorie – mais pas toutes –, le

photon est une corde ouverte semblable à un méson, mais beaucoup plus petite. Dans toutes les versions, le graviton est une corde fermée ressemblant pour l'essentiel à une glueball miniature. Se pourrait-il qu'il y ait une façon de voir aussi profonde qu'inattendue dans laquelle ces deux sortes de cordes – cordes fondamentales et cordes QCD – seraient, en quelque sorte, les mêmes objets ? Du fait de la discordance de leurs tailles, cela pourrait paraître peu probable mais les théoriciens des cordes commencent à soupçonner que l'énorme différence d'échelle est trompeuse. Nous verrons au chapitre 23 qu'il y a une unité à la théorie des cordes mais, pour l'instant, nous nous référerons à ses deux versions comme à des phénomènes distincts.

Une corde correspond à n'importe quel objet beaucoup plus long qu'épais : les lacets de chaussure et les fils de pêche sont des cordes. En physique, le mot *corde* suppose de plus l'élasticité : les cordes peuvent être étirées aussi bien que déformées, comme des tendeurs ou des élastiques. Les cordes QCD sont solides – on pourrait soulever un camion de bonne taille à l'extrémité d'un méson – mais les cordes fondamentales le sont plus encore. En fait, malgré leur extrême finesse, elles sont incroyablement solides, largement plus que n'importe quoi fait de matière ordinaire. On pourrait suspendre à l'extrémité d'une corde fondamentale de l'ordre de 10^{40} camions. Cette énorme résistance à la tension fait qu'il est extrêmement difficile d'étirer une corde fondamentale pour atteindre une longueur appréciable. De ce fait, la taille standard d'une corde fondamentale pourrait bien être presque aussi petite que la longueur de Planck.

La mécanique quantique ne joue pas grand rôle en ce qui concerne les cordes que nous rencontrons dans la vie quotidienne – tendeurs, élastiques ou boulettes de gomme – mais les cordes QCD et fondamentales sont quantiques au plus haut point. Cela signifie, entre autres choses, que l'énergie ne peut s'ajouter que par quantités discrètes, indivisibles. Passer d'une valeur de l'énergie à une autre ne peut se faire que par des « sauts quantiques » en montant l'escalier des niveaux d'énergie.

Le bas de ce dernier est appelé *état fondamental*. Ajouter une seule unité d'énergie amène au *premier état excité*. En grim pant d'une autre marche l'escalier de l'énergie, on arrive au *deuxième état excité*, et ainsi de suite. Les particules élémentaires ordinaires, comme les électrons et les photons, sont tout en bas de l'escalier.

S'ils sont un tant soit peu en vibration, c'est seulement avec le mouvement quantique au point zéro. Mais, si la théorie des cordes est exacte, on peut les faire tourner et vibrer en augmentant leur énergie (et donc leur masse).

Une corde de guitare peut être excitée en la pinçant avec un médiator mais vous vous doutez bien que cet outil est bien trop grand pour pincer un électron. La façon de faire la plus simple est de heurter l'électron avec une autre particule. En réalité, nous nous servons d'une particule comme d'un « médiator » pour pincer l'autre. Pour peu que la collision soit suffisamment violente, il en résultera que les deux cordes vibreront dans des états excités. La question qui vient évidemment après est : « Pourquoi les expérimentateurs n'excitent-ils pas des électrons ou des photons dans des accélérateurs et ne règlent-ils pas ainsi une fois pour toutes la question de savoir si les particules sont des cordes fondamentales vibrantes ? » Le problème vient de la taille des marches : c'est trop gros ! L'énergie nécessaire pour mettre un hadron en rotation ou en vibration est modeste selon les critères de la physique moderne ; par contre, l'énergie nécessaire pour exciter une corde fondamentale est monstrueusement grande. Augmenter l'énergie d'un électron d'une unité fera grimper sa masse presque à celle de Planck. Pis encore, cette énergie doit être concentrée dans une portion d'espace extrêmement petite. De façon sommaire, il nous faudrait comprimer la masse d'un milliard de milliards de protons dans un diamètre un milliard de milliards de fois plus petit que celui d'un proton... Aucun accélérateur jamais construit ne peut s'approcher seulement de cela. Ça n'a jamais été fait et ne le sera probablement jamais¹.

Les cordes qui se trouvent dans un état d'excitation élevé sont en moyenne plus grandes que leurs homologues à l'état fondamental ; l'énergie supplémentaire les retourne et les étire en longueur. Si l'on pouvait bombarder une corde avec une énergie suffisante, elle se déploierait et deviendrait aussi grosse qu'une pelote de fil emmêlée et tressaillant violemment. Il n'y a pas de limite : avec encore plus d'énergie, la corde pourrait être excitée jusqu'à avoir n'importe quelle taille.

1. C'est la raison pour laquelle certains physiciens affirment que la théorie des cordes reste non prouvée expérimentalement. Il y a du vrai dans cela, mais les physiciens, théoriciens comme expérimentateurs, n'y sont pour rien. Il faudra construire un accélérateur de taille galactique. Ah oui, et puis aussi réunir les millions de milliards de barils de pétrole qu'il consommera à chaque seconde...

Même si nous ne pouvons le faire en laboratoire, la nature possède une manière de créer des cordes prodigieusement excitées : comme nous le verrons au chapitre 21, les trous noirs – même les géants qui sont au centre de galaxies – sont des cordes monstrueuses enchevêtrées, extrêmement grandes.



**Les cordes les plus simples
sont des particules élémentaires**

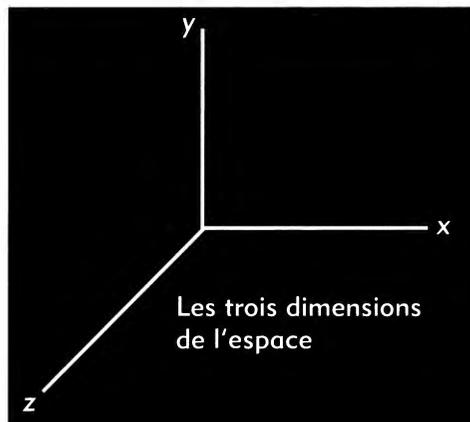


**Secouez-les et ajoutez
de l'énergie**



**Ajoutez encore
plus d'énergie**

La mécanique quantique a aussi une autre conséquence, importante et fascinante, qui est très subtile et bien trop technique pour qu'on puisse l'expliquer dans ces pages. L'espace, tel que nous le percevons d'ordinaire, est tridimensionnel. Il y a beaucoup d'appellations pour ces trois dimensions : par exemple longitude, latitude et altitude ; ou longueur, largeur et hauteur. Mathématiciens et physiciens décrivent ces dimensions en utilisant trois axes appelés x , y et z .



Mais les cordes fondamentales ne se plaisent pas avec seulement trois dimensions pour se déplacer. Je veux dire par là que les mathématiques subtiles de la théorie des cordes vont de travers tant qu'on n'ajoute pas des dimensions supplémentaires. Les théoriciens des cordes ont découvert il y a longtemps que les mathématiques de leurs ensembles d'équations ne fonctionnaient plus si l'on n'ajoutait pas *six dimensions supplémentaires*. J'ai toujours pensé que si l'on comprenait quelque chose suffisamment bien, on devait pouvoir l'expliquer en termes non techniques. Mais la nécessité de six dimensions supplémentaires en théorie des cordes échappe aux explications simples, même après plus de trente-cinq ans. J'ai bien peur qu'il ne me faille emprunter la porte de sortie des filous en disant : « On peut montrer que... »

Je serais très surpris de rencontrer quelqu'un capable de visualiser quatre ou cinq dimensions, sans parler de neuf¹. Je ne le peux pas mieux que vous mais je peux ajouter six autres lettres de l'alphabet – *r, s, t, u, v, w* – aux habituels *x, y* et *z* puis mettre en branle tous les symboles de l'algèbre et du calcul. Avec neuf directions où se mouvoir, « on peut montrer que » la théorie des cordes est mathématiquement cohérente.

Vous pouvez bien sûr demander : si la théorie des cordes a besoin de neuf dimensions et qu'on n'en observe que trois dans l'espace, est-ce que cela ne rend pas évident d'entrée de jeu qu'elle est fautive ? Les choses ne sont pas aussi simples. De nombreux physiciens très fameux – y compris Einstein, Wolfgang Pauli, Felix Klein, Steven Weinberg, Murray Gell-Mann et Stephen Hawking (aucun d'entre eux n'étant un théoricien des cordes) – ont très sérieusement envisagé que l'espace ait plus de trois dimensions. Ils n'étaient évidemment pas victimes d'hallucinations : c'est donc que les dimensions supplémentaires doivent avoir une façon de rester cachées. Les mots à la mode pour cela sont *compact*, *compactifier* et *compactification* : les théoriciens des cordes rendent les six dimensions supplémentaires de l'espace compactes, en les compactifiant par le processus de compactification. L'idée est qu'elles peuvent être emballées dans de très petits nœuds : les énormes créatures que nous sommes sont bien trop grandes pour pouvoir s'y déplacer ou seulement les apercevoir.

1. On entend souvent dire que la théorie des cordes s'exprime en dix dimensions. Cette dimension additionnelle n'est rien d'autre que le temps. Dit autrement, la théorie des cordes travaille avec $(9 + 1)$ dimensions.

Cette notion d'une ou plusieurs dimensions de l'espace pouvant être enroulées en de minuscules géométries – en étant par conséquent trop petites pour être décelées – est un thème banal de la très moderne physique des hautes énergies. Certains pensent que des *dimensions supplémentaires* représentent un concept trop spéculatif – « de la science-fiction avec des équations », comme l'a dit un esprit fin. Mais c'est un malentendu dû à l'ignorance. Toutes les théories modernes des particules élémentaires utilisent peu ou prou des dimensions supplémentaires pour fournir les mécanismes manquants qui rendent complexes les particules.

Les théoriciens des cordes n'ont pas inventé le concept de dimensions supplémentaires mais l'ont utilisé de façon créative. Bien que la théorie des cordes nécessite six dimensions supplémentaires, on peut saisir l'idée générale en ajoutant une seule dimension nouvelle à l'espace. Examinons cela dans le contexte le plus simple : commençons par un monde possédant une seule dimension – appelons-le Lineland¹, le monde-ligne – puis finissons par ajouter une dimension supplémentaire compacte. Repérer un point dans Lineland ne nécessite qu'une coordonnée que ses habitants appellent X.

Pour rendre Lineland intéressant, il nous faut y ajouter quelques objets : créons donc des particules se déplaçant le long de la ligne.



Imaginez-les comme de minuscules perles qui peuvent s'agglutiner pour former des atomes, des molécules et peut-être des êtres vivants à une dimension. (J'ai plutôt des doutes sur le fait que la vie puisse exister dans un monde unidimensionnel, mais faisons taire cette incrédulité à ce sujet.) Imaginez tant la ligne que les perles comme étant infiniment fines en sorte qu'elles ne se coincent pas dans les autres dimensions.²

Quelqu'un d'astucieux pourrait décrire de nombreuses versions alternatives de Lineland. Les perles pourraient toutes être

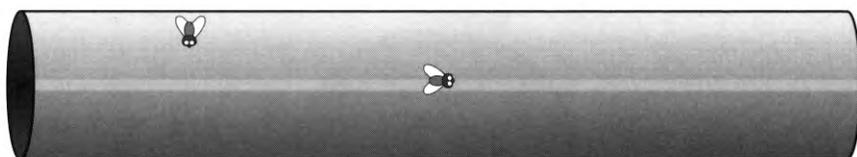
1. Allusion à *Flatland*, le « plat pays », un monde bidimensionnel inventé par Edwin A. Abbott. Voir note 2 p. 234. (*N.d.T.*)

2. Le modèle CGHS que j'ai décrit au chapitre 15 n'est autre que Lineland, mais un Lineland auquel on a ajouté un trou noir massif (et, sans nul doute, dangereux) à une extrémité de l'espace des Linelanders.

semblables ou alors, pour former un monde plus intéressant, il pourrait exister des perles de plusieurs sortes. Pour suivre ces différents types, nous pourrions leur attribuer des couleurs : rouge, bleu, vert, et ainsi de suite. Je peux imaginer des possibilités sans fin : les perles rouges attirent les bleues mais repoussent les vertes. Les perles noires sont très lourdes tandis que les blanches n'ont pas de masse et se déplacent à travers Lineland à la vitesse de la lumière. Nous pouvons même autoriser les perles à être quantiques, la couleur d'une quelconque perle donnée étant incertaine.

La vie en une seule dimension est très limitée. Avec pour seule liberté le déplacement le long d'une ligne, les Linelanders se heurtent inévitablement les uns aux autres. Peuvent-ils communiquer ? Facilement : ils peuvent lancer la perle du bout sur une autre et envoyer ainsi des messages. Mais leur vie sociale est très pauvre : chaque créature n'a que deux connaissances – une à sa gauche et une à sa droite. Il faut au moins deux dimensions pour avoir un cercle de relations.

Mais les apparences sont trompeuses. En observant à travers un microscope très puissant, les Linelanders ont la surprise de découvrir que leur monde est en fait bidimensionnel. Ce qu'ils voient n'est pas une ligne mathématique idéale d'épaisseur nulle mais plutôt la surface d'un cylindre. La circonférence du cylindre est bien trop petite pour que, d'ordinaire, les Linelanders la détectent mais, à travers le microscope, des objets beaucoup plus petits, encore plus que les atomes de Lineland, se révèlent – ils sont si petits qu'ils peuvent se déplacer dans *deux* directions.



Comme leurs frères de Brobdingnag¹, ces Lilliputiens de Lineland peuvent se déplacer sur toute la longueur du cylindre

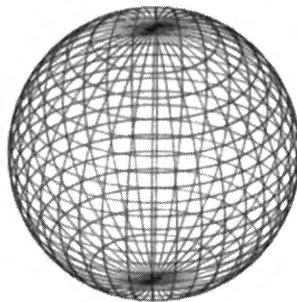
1. Brobdingnag est le pays peuplé par des géants dans le livre célèbre écrit en 1721 par Jonathan Swift *Les Voyages de Gulliver*. Son pendant peuplé d'êtres tout petits est l'île de Lilliput. (*N.d.T.*)

mais ils sont suffisamment petits pour pouvoir le faire aussi autour de sa circonférence. Ils peuvent aussi se déplacer simultanément dans les deux directions, tournant en vrille autour du cylindre. Et, ô joie, ils peuvent aussi se dépasser sans se heurter. À bon droit, ils affirment vivre dans un espace à deux dimensions mais possédant quelque chose d'étrange : s'ils se déplacent tout droit dans la dimension supplémentaire, ils reviennent vite au même point.

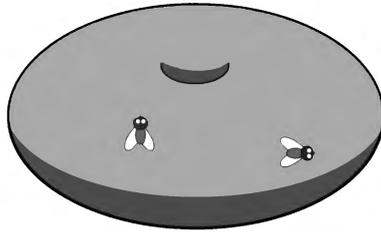
Les Linelanders ont besoin de donner un nom à la nouvelle dimension, qu'ils appellent donc Y. Mais, à la différence de X, ils ne peuvent pas se déplacer rapidement le long de Y sans revenir à leur point de départ. Les mathématiciens linelanders disent que la direction Y est *compacte*.

Le cylindre représenté page précédente est ce qu'on obtient en ajoutant une direction compacte au monde unidimensionnel de départ. Ajouter six dimensions à un monde qui en a déjà trois est bien au-delà de la capacité de visualisation d'un cerveau humain. Mathématiciens et physiciens ne sont pas des mutants capables de voir un nombre quelconque de dimensions. Mais ce qui les différencie des autres est qu'ils ont subi un entraînement mathématique pénible – toujours la reprogrammation du cerveau... – pour « voir » les dimensions supplémentaires.

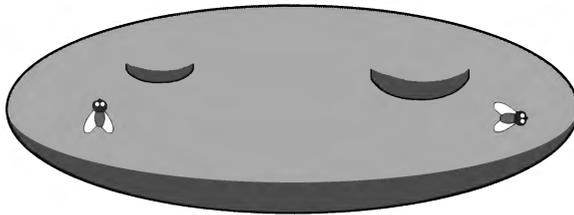
Une seule dimension en plus n'apporte pas beaucoup de perspectives de diversité. Se déplacer dans la direction compacte serait comme marcher en rond sans s'en rendre compte. Mais rien que deux dimensions de plus permettent une variété sans fin d'opportunités nouvelles. Les deux dimensions supplémentaires peuvent former une sphère,



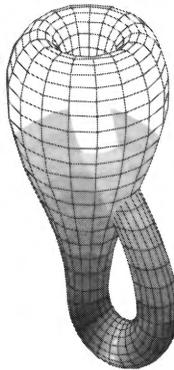
un tore (la surface d'un beignet),



un beignet à deux ou trois trous,

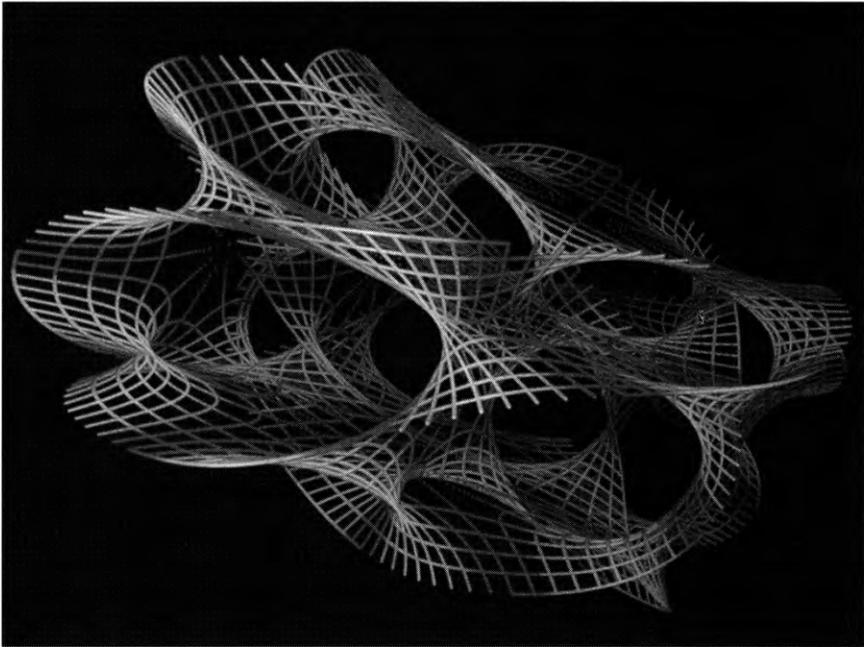


ou même cet espace curieux appelé bouteille de Klein.



Il n'est pas si difficile de dessiner deux dimensions de plus – nous venons de le faire – mais plus leur nombre augmente, plus il devient difficile de les visualiser. Le faire pour les six dimensions supplémentaires requises par la théorie des cordes sans l'aide des mathématiques est alors sans espoir. Les espaces géométriques particuliers utilisés par les théoriciens des cordes pour compactifier les six dimensions supplémentaires sont appelés *variétés de Calabi-Yau* : il y en a des millions, tous différents. Les variétés de Calabi-Yau sont extrêmement complexes, avec des centaines de trous de

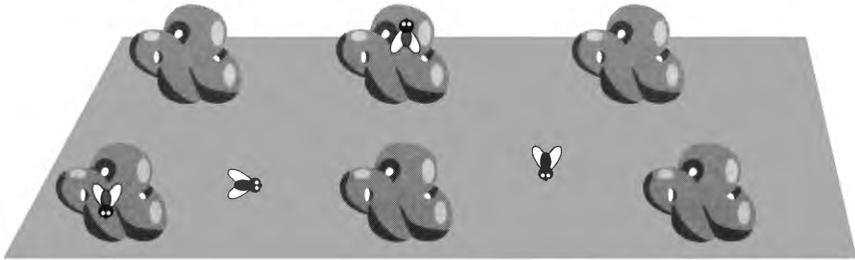
beignet à six dimensions et d'inimaginables torsions du genre bretzel. Néanmoins, les mathématiciens les représentent en les coupant en tranches dessinées de dimension inférieure, de façon semblable aux diagrammes de plongement. Voici la représentation d'une tranche à deux dimensions d'un espace de Calabi-Yau typique.



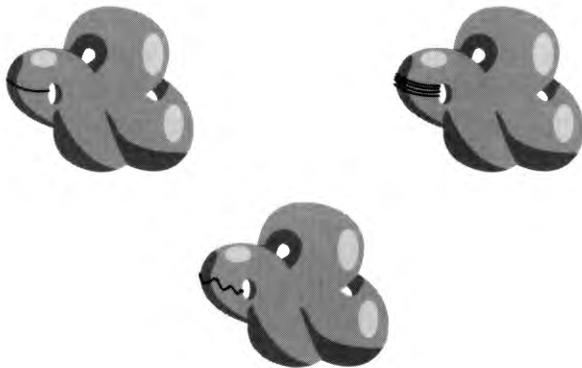
Je vais essayer de vous donner une idée de l'allure de l'espace ordinaire quand une variété de Calabi-Yau à six dimensions est attachée à chacun de ses points. Regardons d'abord les dimensions usuelles dans lesquelles de gros objets comme les êtres humains, peuvent se déplacer. (J'ai fait le dessin en deux dimensions mais vous devriez maintenant être capable d'ajouter la troisième dimension en imagination.)



En chaque point de l'espace à trois dimensions, il y a de plus six autres dimensions compactes dans lesquelles de très petits objets peuvent se mouvoir. J'ai été obligé de dessiner les espaces de Calabi-Yau séparés les uns des autres mais il vous faut les visualiser en chaque point de l'espace ordinaire.



Revenons-en aux cordes. Un tendeur ordinaire peut être étiré dans de nombreuses directions – par exemple en suivant l'axe est-ouest, ou l'axe nord-sud, ou l'axe haut-bas. Il peut être étiré selon des angles variés, amenant le nord au nord-ouest avec une inclinaison de 10 degrés par rapport à l'horizontale. Mais s'il y a des dimensions supplémentaires, les possibilités s'en trouvent multipliées. En particulier, les cordes peuvent être étirées autour d'une dimension compacte. Une corde fermée peut faire une boucle, ou plusieurs, autour de l'espace de Calabi-Yau tout en n'étant pas étirée du tout selon les directions ordinaires de l'espace.



On peut encore compliquer les choses : la corde peut s'enrouler autour de l'espace compact et onduler en même temps, les ondulations se propageant autour de la corde comme un serpent.

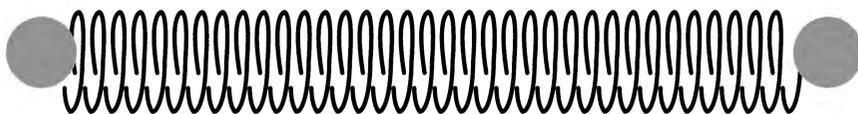
Étirer une corde autour d'une direction compacte et la faire onduler nécessite de l'énergie et les particules décrites par ces cordes seront plus lourdes que des particules ordinaires.

Forces

Dans notre univers, on ne trouve pas seulement espace, temps et particules, mais aussi des forces. Les forces électriques agissant entre particules chargées peuvent déplacer des morceaux de papier et des grains de poussière (pensez à l'électricité statique) mais, plus important, les mêmes forces maintiennent les électrons des atomes en orbite autour des noyaux. Les forces gravitationnelles qui sont à l'œuvre entre la Terre et le Soleil maintiennent la première en orbite.

Toutes les forces proviennent en dernier lieu des forces microscopiques qui s'exercent entre particules individuelles. Mais d'où viennent ces forces agissant entre les particules ? Pour Newton, la force d'attraction gravitationnelle universelle entre masses est une simple donnée de la nature, quelque chose qu'il pouvait décrire mais pas expliquer. Mais, aux XIX^e et XX^e siècles, des physiciens comme Michael Faraday, James Clerk Maxwell, Albert Einstein et Richard Feynman ont eu des idées brillantes pour expliquer les forces à partir de concepts sous-jacents plus fondamentaux.

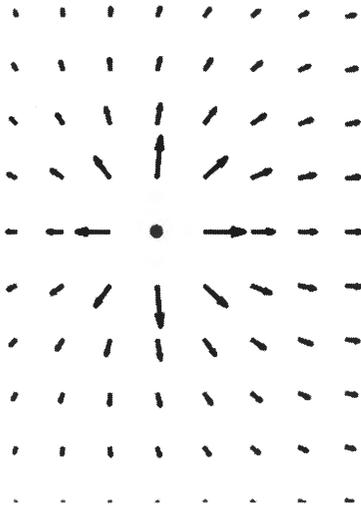
D'après Faraday et Maxwell, les charges électriques ne se poussent ou ne se tirent pas directement les unes les autres : il y a, dans l'espace, un intermédiaire qui transmet la force. Imaginez un Slinky – un de ces jouets élastiques mous – tendu entre deux balles distantes.



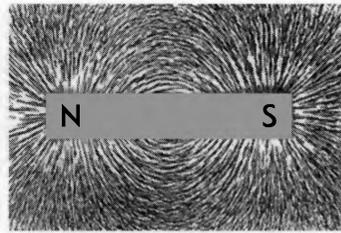
Chaque balle exerce une force uniquement sur le morceau de Slinky qui lui est adjacent. Puis chaque morceau de Slinky exerce une force sur ses voisins. La force est transmise à travers le Slinky jusqu'à ce qu'elle tire sur l'objet à l'extrémité. On peut croire que

les deux objets se tirent l'un l'autre, mais c'est une illusion créée par l'intermédiaire du Slinky.

Dans le cas des particules électriquement chargées, les agents intermédiaires sont les champs électrique et magnétique qui remplissent l'espace entre elles. Bien qu'invisibles, ces champs n'en sont pas moins tout à fait réels : il s'agit de distorsions douces, invisibles, de l'espace qui transmettent les forces entre les deux charges.



**Champ électrique créé
par une charge positive**



**Champ électrique créé
par une barre aimantée**

Einstein est même allé plus loin dans sa théorie de la gravitation. Dans leur voisinage, les masses gauchissent la géométrie de l'espace-temps ; ce faisant, elles déforment les trajectoires des autres masses. Ces distorsions de la géométrie peuvent aussi être regardées comme étant des champs.

On aurait pu croire que c'en était fini. Cela a été le cas, jusqu'à ce que Richard Feynman débarque avec une théorie quantique des forces qui, à première vue, semble complètement différente de la théorie des champs de Faraday-Maxwell-Einstein. Sa théorie commence avec l'idée que des particules électriquement chargées peuvent émettre (lancer) et absorber (capturer) des photons. Il n'y avait pas là matière à controverse : on avait depuis longtemps compris que les rayons X sont émis quand des élec-

trons sont arrêtés brutalement par un obstacle dans le tube à rayons X. Le processus inverse d'absorption était déjà présent dans l'article d'Einstein où il a introduit pour la première fois l'idée de quanta de lumière.

Feynman a décrit une particule chargée comme jonglant avec les photons, émettant, absorbant, créant de nombreux photons dans l'espace entourant la charge. Un électron qui se tient tranquille est un jongleur parfait qui ne rate jamais une prise. Mais, exactement comme ce qui arriverait à un jongleur humain dans un train, une accélération brusque peut tout déranger. La charge peut être arrachée à sa position, avec pour conséquence qu'elle se trouve au mauvais endroit pour absorber le photon. Le photon manqué s'échappe et devient un peu de rayonnement lumineux.

Retournons dans le train alors que le partenaire du jongleur vient d'y monter et que tous les deux ont décidé de faire équipe en s'essayant à quelques jongleries coordonnées. Pour l'essentiel, chaque jongleur rattrape ses propres lancers mais, quand ils sont suffisamment proches, il arrive que, de temps en temps, l'un attrape une balle lancée par l'autre. C'est la même chose qui se produit lorsque deux charges électriques sont proches. Les nuages de photons qui entourent les charges se pénètrent et une charge peut absorber un photon émis par l'autre. Ce processus est appelé *échange de photons*.

Conséquence de cet échange : les charges exercent des forces l'une sur l'autre. La question difficile de savoir si la force est attractive (une traction) ou répulsive (une poussée) ne trouve de réponse que dans les subtilités de la mécanique quantique. Qu'il nous suffise de dire que les calculs de Feynman l'ont conduit aux mêmes conclusions que celles prédites par Faraday et Maxwell : quand elles sont de même signe, les charges se repoussent tandis qu'elles s'attirent dans le cas contraire.

Il est intéressant de comparer l'aptitude à jongler des électrons avec celle de jongleurs humains. Un humain est probablement capable d'effectuer quelques lancers-captures par seconde ; un électron émet et absorbe environ 10^{19} photons par seconde.

D'après la théorie de Feynman, c'est toute la matière qui jongle, pas seulement les électrons. Toute forme de matière émet et absorbe des gravitons – les quanta du champ gravitationnel. La Terre et le Soleil sont entourés de nuages de gravitons qui se

mêlent et sont échangés. Le résultat est la force gravitationnelle qui maintient la Terre en orbite.

À quelle fréquence un simple électron émet-il un graviton ? La réponse est étonnante : vraiment pas souvent. En moyenne, il faut plus de temps que tout l'âge de l'univers pour qu'un électron émette un unique graviton. C'est pourquoi, selon la théorie de Feynman, la force gravitationnelle entre deux particules élémentaires est si faible comparée à la force électrique.

Alors... Quelle est la bonne théorie ? Celle du champ de Faraday-Maxwell-Einstein ou celle des particules jongleuses de Feynman ? Elles paraissent bien trop différentes pour être vraies toutes deux.

Et pourtant, elles le sont ! La clef est la complémentarité quantique entre ondes et particules que j'ai exposée au chapitre 4. Les ondes sont un concept de champ : les ondes lumineuses ne sont rien d'autre qu'une rapide ondulation du champ électromagnétique. Mais la lumière est faite de particules – les photons. C'est pourquoi la description des forces de Feynman à l'aide de particules et celle de Maxwell à l'aide de champs sont un exemple de plus de complémentarité quantique. Le champ quantique créé par le nuage de particules jongleuses est appelé un *condensat*.

Y a du mou dans la corde à nœuds

Voici la dernière blague qui circule parmi les théoriciens des cordes.

Deux cordes entrent dans un bar et commandent deux bières. Le barman dit à l'une des deux : « Salut ! Ça fait un bail ! Comment va ? » Puis il se tourne vers l'autre et dit : « Z'êtes nouvelle par ici, pas vrai ? Z'êtes une corde fermée comme vot' copine ? » Et la seconde corde de répondre : « Je nœud crois pas. »

Qu'est-ce qu'il y a ? Vous vous attendiez à quoi de la part d'un théoricien des cordes ?

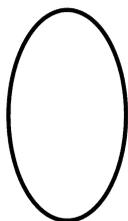
La blague s'arrête là, mais pas l'histoire. Le barman se sent un peu dans les vapes. Peut-être a-t-il bu en douce quelques coups de trop, planqué derrière son bar, ou alors c'est peut-être le chatolement des fluctuations quantiques des deux clientes qui lui tourne la tête. Mais non, c'est plus que le soubresaut standard : les cordes paraissent se déplacer de façon très étrange comme si quelque

force cachée tirait sur... les cordes et les liait. Quand l'une fait un mouvement brusque, l'autre est enlevée de son tabouret un instant plus tard, et vice versa. Pourtant, il ne semble pas qu'il y ait quoi que ce soit qui les relie.

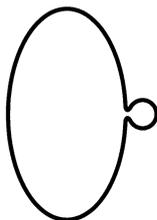
Fasciné par ce comportement curieux, le barman regarde attentivement l'espace qui sépare les cordes, à la recherche d'un indice. Au début, tout ce qu'il réussit à voir c'est un vague chatolement, une troublante distorsion de la géométrie mais, après avoir écarquillé les yeux pendant une minute environ, il remarque que de petits morceaux de corde se détachent sans arrêt du corps des clientes, formant un condensat entre elles. C'est ce condensat qui les tire et les emmêle.

Effectivement, les cordes émettent et absorbent d'autres cordes. Prenons le cas de cordes fermées. Une corde quantique ne se contente pas de soubresauts avec le mouvement au point zéro, elle peut se diviser en deux cordes. Je décrirai ce processus au chapitre 21 ; pour l'instant, un simple dessin vous donnera l'idée générale.

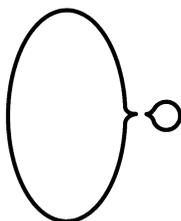
Voici un dessin de corde fermée.



La corde ondule en une sorte de mouvement de pincement jusqu'à ce qu'un appendice en forme d'oreille se forme.

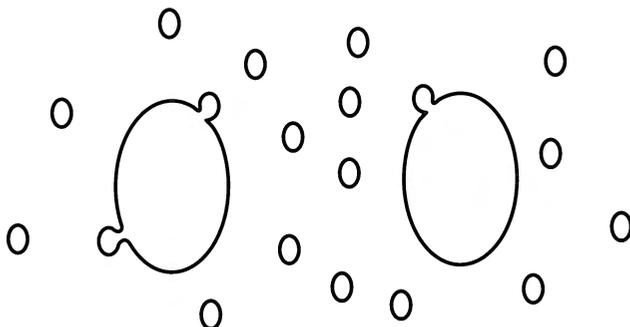


La corde est maintenant prête à se partager, émettant un petit bout d'elle-même.



Le contraire est aussi possible : une petite corde en rencontrant une autre plus grande peut être absorbée dans le processus inverse.

Ce que le barman a vu est un condensat de petites cordes – comme un nuage de mouches quantiques – entourant ses clientes. Mais quand il regardait de plus loin, le condensat flou semblait simplement déformer sa vision – exactement comme une portion d’espace-temps courbe le ferait.



Les petites boucles fermées de cordes sont des gravitons, grouillant autour des cordes plus grandes et formant un condensat qui imite de près les effets du champ gravitationnel. Les gravitons – les quanta de ce dernier – ont des structures semblables aux glueballs de la physique nucléaire, mais sont 10^{19} fois plus petits. On se demande ce que cela pourrait bien vouloir dire – si cela veut dire quelque chose – pour la physique nucléaire.

Certains physiciens travaillant dans d’autres domaines de physique ont été irrités par l’enthousiasme des théoriciens des cordes. Ces derniers avancent que « les belles, élégantes, consistantes, robustes mathématiques de la théorie des cordes ont pour conséquence ce phénomène extraordinaire, incroyable, fantastique que sont les forces gravitationnelles ; alors cette théorie ne peut qu’être vraie ». Mais, pour des personnes extérieures sceptiques, un amon-

cellement de superlatifs, quand bien même ils seraient justifiés, ne constitue pas un argument convaincant. Si la théorie des cordes est la bonne théorie de la nature, pour la confirmer, il faut des prédictions expérimentales concluantes, des tests empiriques, pas des superlatifs. Et ils ont raison... tout comme les théoriciens des cordes. Le vrai problème est la difficulté extrême qu'il y a à faire des expériences sur des objets un milliard de milliards de fois plus petits qu'un proton. Mais, que la théorie des cordes finisse par être confirmée expérimentalement ou pas, elle n'en est pas moins un laboratoire basé sur de solides mathématiques et dans lequel nous pouvons tester diverses idées sur la façon dont la gravitation cohabite avec la mécanique quantique.

Étant donné que la gravitation apparaît dans la théorie des cordes, nous pouvons présumer que, lorsque des cordes suffisamment massives sont réunies, il se forme un trou noir. Voilà pourquoi la théorie des cordes est un cadre dans lequel le paradoxe de Hawking peut être examiné. Si l'affirmation de Hawking selon laquelle les trous noirs entraînent inévitablement une perte de l'information est vraie, les mathématiques de la théorie des cordes devraient le confirmer. Si Hawking a tort, elles devraient nous montrer comment l'information peut s'échapper d'un trou noir.

Au début des années 1990, quand, si ma mémoire est bonne, Gerard 't Hooft et moi-même nous rendîmes visite l'un l'autre deux fois à Stanford et une fois à Utrecht, 't Hooft se méfiait en général de la théorie des cordes, bien qu'il ait écrit un des articles majeurs expliquant le lien entre cette dernière et la théorie quantique des champs. Je n'ai jamais été sûr de l'origine de cette méfiance mais je soupçonne que c'était en partie à cause du fait que, depuis 1985, l'establishment de la physique théorique américaine était dominé de façon homogène et écrasante par les théoriciens des cordes. 'T Hooft, éternel opposant, croit (tout comme moi) que la diversité fait la force. Multiplier les voies pour aborder une question, faire appel à différentes façons de penser : c'est ainsi qu'on obtient les meilleures chances de résoudre les questions vraiment difficiles de la science.

Mais, dans le scepticisme de Gerard, il y avait plus que la simple irritation devant la mainmise de la physique par un groupe trop étroit. Pour autant que je sache, il convient qu'il y a une certaine valeur à la théorie des cordes mais se rebelle devant l'affir-

mation que la théorie des cordes est la « théorie finale ». La théorie des cordes a été découverte par accident et son développement s'est fait par petits à-coups. À aucun moment nous n'avons eu un ensemble complet de principes ou un petit ensemble d'équations bien définies. Aujourd'hui encore, elle consiste en un réseau imbriqué de faits mathématiques qui tiennent ensemble avec une cohérence remarquable mais ne viennent pas s'ajouter au type d'ensembles compacts de principes qui caractérisent la théorie de la gravitation de Newton, la relativité générale ou la mécanique quantique. Il s'agit plutôt d'une chaîne composée de pièces qui s'adaptent les unes aux autres comme un puzzle dont nous percevons à peine l'image d'ensemble. Rappelez-vous la citation de 't Hooft au début de ce chapitre : « Imaginez que je vous fournisse une chaise tout en vous expliquant qu'il y manque encore les pieds et que l'assise, le dossier et les accoudoirs ne devraient pas tarder à être livrés. Je ne sais pas trop ce que je vous aurai donné, mais peut-on vraiment parler de chaise ? »

Il est vrai que la théorie des cordes n'est pas encore une théorie achevée mais, pour l'instant, c'est de loin notre meilleur guide mathématique vers les principes finals de la gravité quantique. J'ajouterai qu'elle a été notre arme la plus puissante dans la guerre du trou noir, confirmant particulièrement les propres convictions de Gerard.

Dans les trois prochains chapitres, nous allons voir comment la théorie des cordes nous aide à expliquer et à confirmer la complémentarité du trou noir, l'origine de l'entropie d'un trou noir et le principe holographique.

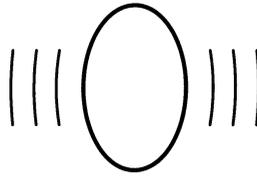
L'avion d'Alice ou la dernière hélice visible

Pour la plupart des physiciens, particulièrement les spécialistes de la relativité générale, la complémentarité du trou noir paraissait trop folle pour être vraie. Ce n'était pas le fait de se sentir mal à l'aise avec l'ambiguïté du monde quantique : à l'échelle de Planck, elle est parfaitement admise. Mais la complémentarité du trou noir proposait quelque chose de bien plus radical : selon l'état du mouvement de l'observateur, un atome peut rester un minuscule objet ou se répandre sur tout l'horizon d'un énorme trou noir. L'équivoque à un tel niveau est difficile à avaler. Cela me paraissait étrange à moi aussi.

Alors que je réfléchissais à tout cela pendant les semaines qui ont suivi la conférence de Santa Barbara en 1993, ce comportement particulier m'a fait me rappeler quelque chose que j'avais déjà rencontré. Vingt-quatre ans plus tôt, alors que la théorie des cordes était dans sa petite enfance, j'avais été contrarié par une propriété troublante des minuscules objets semblables à des cordes – à l'époque, je parlais d'« élastiques » – qui constituaient les particules élémentaires.

D'après la théorie des cordes, tout ce qu'il y a dans l'univers est fait de cordes élastiques unidimensionnelles d'énergie qu'on peut étirer, pincer et faire tourner. Commencez par penser à une particule comme étant un élastique minuscule pas beaucoup plus grand que la longueur de Planck. Un élastique, si on le pince, se met à gigoter et à vibrer et, en l'absence de frottements entre les morceaux de l'élastique, cela continuera indéfiniment.

Ajouter de l'énergie à une corde la fait osciller encore plus violemment et cela va parfois à un point tel qu'elle se met à ressem-



bler à une énorme pelote de fil fluctuant violemment. Ces oscillations sont des *fluctuations thermiques*, qui ajoutent effectivement de l'énergie à la corde.



Mais il ne faut pas oublier les soubresauts quantiques. Même lorsque toute l'énergie est évacuée d'un système, le laissant à son état fondamental, les soubresauts ne cessent jamais complètement. Ce mouvement compliqué d'une particule élémentaire est subtil mais, à l'aide d'une analogie, je peux vous en donner une idée. Cependant je veux d'abord vous parler des sifflets pour chiens, les sifflets à ultrasons, et des hélices d'avion.

Peu en importe la raison, mais les chiens entendent des sons de haute fréquence inaudibles pour les humains. Peut-être le tympan d'un chien est-il plus fin et capable de vibrer à de plus hautes fréquences. Toujours est-il que, si vous voulez appeler votre chien sans déranger les voisins, il vous faut utiliser un sifflet pour chiens qui produit un son de si haute fréquence que le système auditif humain y est imperméable.

Imaginez maintenant Alice plongeant dans un trou noir et soufflant dans son sifflet pour chiens pour envoyer un signal à Rex qu'elle a laissé à la garde de Bob¹. Au début, Bob n'entend rien : la fréquence est trop élevée pour ses oreilles. Mais rappelez-vous

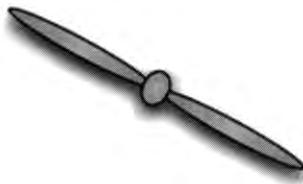
1. En toute rigueur, le son ne peut pas se propager dans le vide. Vous pouvez donc soit en revenir à l'analogie du drain, soit remplacer le sifflet d'Alice par une torche électrique à lumière ultraviolette.

ce qui arrive à un signal émis près de l'horizon. Selon Bob, Alice et tout ce qui va avec elle semblent ralentir. C'est vrai aussi de l'ultrason de son sifflet. Bien que Bob ait été au départ en dehors de la portée du son, le sifflet lui devient audible à mesure qu'Alice s'approche de l'horizon. Supposons que le sifflet d'Alice ait toute une gamme de hautes fréquences, certaines même hors de portée de Rex. Qu'est-ce que Bob entendra ? Au début, rien ; mais il entendra bientôt les plus basses fréquences émises par le sifflet. Plus tard, c'est le son émis qui suit en montant l'échelle des fréquences qui deviendra audible. Au bout d'un certain temps, Bob entendra toute la symphonie des sons produits par le sifflet d'Alice. Gardez cette histoire en mémoire pendant que je vous parle maintenant des hélices d'avion.

Il est très probable que vous avez eu l'occasion de voir une hélice d'avion en train de s'arrêter. Au début, les pales sont invisibles : tout ce qu'on voit est le moyeu au centre.

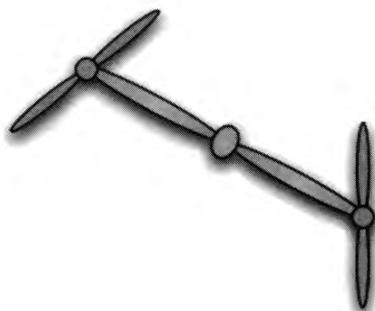


À mesure que l'hélice ralentit et que sa fréquence de rotation descend au-dessous de trente tours par seconde, les pales apparaissent et l'ouvrage entier grandit.



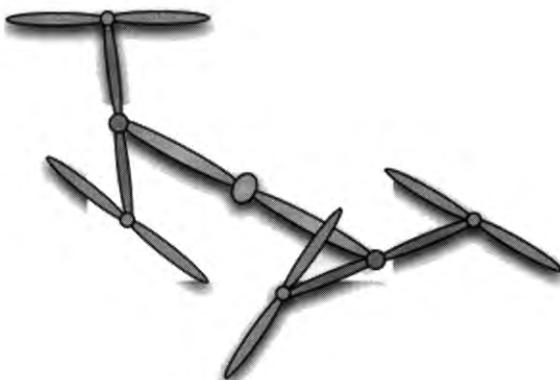
Imaginez maintenant un avion avec une nouvelle sorte d'hélice « composée ». Appelons-le l'Avion d'Alice. Au bout de chaque pale, il y a un autre moyeu au centre de pales supplémentaires de « deuxième niveau ». Ces dernières tournent beaucoup plus vite que les pales du début – disons dix fois plus vite.

Quand les pales de premier niveau apparaissent, celles de deuxième niveau sont toujours invisibles. En même temps que l'hélice ralentit encore, elles s'offrent à la vue à leur tour. À nouveau, la structure paraît grossir. Des pales de troisième niveau sont fixées aux extrémités de celle du deuxième. Elles tournent dix fois



plus vite que ces dernières. Il faudra un ralentissement encore plus grand mais, avec le temps, l'hélice composée semblera recouvrir une surface croissante.

L'Avion d'Alice n'en reste pas à trois niveaux. Ses hélices se composent sans fin et, quand il ralentit, il laisse apparaître une plus grande partie de lui-même. De plus en plus grand, il finit par grandir dans des proportions énormes. Mais, tant que l'hélice ne s'arrête pas complètement, tout ce qu'on peut en voir est un nombre fini de niveaux.



L'étape suivante – mais vous l'avez sans doute déjà deviné – est d'envoyer Alice pénétrer avec son avion à l'intérieur d'un trou noir. Qu'est-ce que Bob verrait ? Après tout ce que je vous ai dit, particulièrement sur les trous noirs et les machines à voyager dans le temps, vous devriez savoir répondre tout seuls. À mesure que le temps s'écoule, l'hélice semblera ralentir. À la fin, la première pale apparaîtra, puis une part de plus en plus grande de l'assemblage

deviendra visible, faisant surgir toujours plus de niveaux pour finir par recouvrir l'horizon entier.

Cela, c'est ce que Bob verrait. Mais que verrait Alice en se déplaçant à côté de l'hélice ? Rien de très inhabituel. Si elle souffle dans son sifflet pour chiens, le son lui restera inaudible. Si elle regarde dans la direction de l'hélice, celle-ci continuera à tourner trop vite pour qu'elle ou son appareil photo puisse la détecter. Elle ne verrait que ce que vous ou moi voyons quand nous regardons une hélice tournant à grande vitesse : le moyeu et rien d'autre.

Vous pensez peut-être que quelque chose ne va pas dans cette description : Alice ne voit sans doute pas les hélices tournant à toute vitesse, mais dire qu'elles sont indétectables paraît trop fort. Après tout, elles pourraient facilement la hacher menu ! C'est effectivement vrai des hélices réelles mais le mouvement dont je parle est plus subtil. Rappelez-vous qu'aux chapitres 4 et 9 je vous ai expliqué qu'il y a deux sortes de fluctuations dans la nature : les soubresauts quantiques et les soubresauts thermiques. Ces derniers sont dangereux : ils peuvent vous faire mal en communiquant de l'énergie à vos terminaisons nerveuses ou cuire un steak. Si la température est suffisamment élevée, ils peuvent déchiqueter molécules ou atomes. Mais vous pouvez laisser votre steak aussi longtemps que vous le voulez dans l'espace vide et froid, les fluctuations quantiques du champ électromagnétique le laisseront complètement cru.

Dans les années 1970, les théoriciens des trous noirs – tels Bekenstein, Hawking et, particulièrement, William Unruh – ont montré que, près de l'horizon d'un trou noir, les soubresauts thermiques et quantiques se mélangent de façon bizarre. Les soubresauts qui paraissent être d'innocentes fluctuations quantiques à quelqu'un qui est en train de traverser l'horizon deviennent d'excessivement dangereuses fluctuations thermiques pour quiconque reste suspendu à l'extérieur du trou noir. Tout se passe comme si les hélices d'Alice au mouvement invisible (pour elle) étaient des soubresauts quantiques tandis que, dans le système de référence de Bob, elles se transforment en soubresauts thermiques au fur et à mesure de leur ralentissement. Le mouvement quantique bénin qu'Alice ne parvient pas à percevoir serait extrêmement dangereux pour Bob si, par mégarde, il flottait juste au-dessus de l'horizon.

Vous avez sans doute fait le lien avec la complémentarité du trou noir. En effet, la similitude avec ce que j'ai expliqué au cha-

pitre 15 à propos des atomes tombant dans un trou noir est frappante. Mais, comme c'était il y a cinq chapitres, je vous fais un bref rappel.

Imaginez que, dans sa chute vers l'horizon, Alice regarde un atome en train de tomber près d'elle. Il semble tout à fait ordinaire, même quand il a traversé l'horizon. Ses électrons continuent à tourner autour du noyau à la vitesse habituelle et il ne paraît pas plus grand que n'importe quel autre atome, environ un milliardième de la taille de cette page.

Quant à Bob, il voit l'atome ralentir alors qu'il s'approche de l'horizon en même temps que les mouvements thermiques le brisent en morceaux et le répandent sur une surface toujours plus grande. L'atome paraît ressembler à un Avion d'Alice miniature.

Est-ce que j'entends par là que les atomes ont des hélices qui ont des hélices qui ont des hélices... à l'infini ? Je vais vous surprendre, mais c'est presque exactement ce que je veux dire ! On imagine en général les particules élémentaires comme étant de très petits objets. Il en est de même du moyeu central de l'hélice composée d'Alice mais l'assemblage entier, en incluant tous les niveaux de la structure, est énorme, voire infini. Pourrions-nous être dans l'erreur quand nous disons que les particules sont petites ? Qu'en dit l'expérimentation ?

Pour se représenter leur observation expérimentale, il est commode d'imaginer qu'on photographie un objet en mouvement. L'aptitude à saisir des mouvements rapides dépend de la vitesse avec laquelle l'appareil photographique peut enregistrer l'image : la vitesse d'obturation est la mesure qui compte dans la résolution temporelle. À l'évidence, elle jouera un rôle primordial dans la prise d'une photographie de l'hélice composée d'Alice. Un appareil photo lent ne réussira à prendre que le moyeu principal. Un appareil plus rapide saisira des structures supplémentaires de haute fréquence. Mais même l'appareil le plus rapide aura une limite dans ce qu'il pourra prendre de la structure composée de l'hélice – à moins qu'il ne prenne l'avion alors qu'il tombe dans le trou noir.

La vitesse d'obturation dans une expérience de physique des particules est liée à l'énergie des collisions : plus celle-ci est grande, plus rapide est l'obturation. Malheureusement pour nous, cette vitesse est strictement limitée par la capacité à accélérer les particules à de très grandes énergies. Dans l'idéal, nous aimerions obtenir la résolution de mouvements survenant en deçà de périodes

de temps plus petites que le temps de Planck. Cela nécessiterait d'accélérer des particules à des énergies au-delà de la masse de Planck – chose aisée en principe mais impossible en pratique.

C'est le moment de faire une pause pour regarder les difficultés extraordinaires qui se dressent devant la physique moderne. Pour observer les objets les plus petits et les mouvements les plus rapides, les physiciens, tout au long du xx^e siècle, ont compté sur des accélérateurs de plus en plus grands. Les premiers n'étaient que de simples dispositifs, qui tenaient sur le dessus d'une table, capables de fouiller la structure des atomes. Les noyaux ont nécessité des machines plus grandes, certaines aussi grosses que des immeubles. Les quarks n'ont été découverts que lorsque les accélérateurs ont atteint une longueur de plusieurs kilomètres. Aujourd'hui, le plus grand accélérateur, le grand collisionneur de hadrons à Genève, en Suisse¹, fait presque trente kilomètres de circonférence mais est toujours de loin trop petit pour accélérer des particules jusqu'à la masse de Planck. Quelle taille devrait avoir un accélérateur pour résoudre des mouvements aux fréquences de Planck ? La réponse est décourageante, et c'est un euphémisme : pour accélérer une particule jusqu'à la masse de Planck, un accélérateur devrait être au moins aussi grand que notre galaxie...

Pour dire les choses simplement, regarder des mouvements à l'échelle de Planck avec la technologie moderne est comparable au fait de photographier une hélice d'avion en train de tourner avec un appareil dont l'obturateur reste ouvert pendant environ dix millions d'années. Il n'est pas très surprenant que les particules élémentaires nous paraissent très petites : tout ce que nous pouvons voir, c'est le moyen.

1. Le grand collisionneur de hadrons (en abrégé LHC, d'après son nom anglais Large Hadrons Collider) a été construit au CERN de Genève (aujourd'hui Organisation européenne pour la recherche nucléaire) en réutilisant le tunnel de 27 kilomètres de circonférence enterré à 100 mètres de profondeur de son précédent accélérateur, le LEP, le collisionneur électron-positron. Sa mise en service avait été prévue pour l'été 2008. Une panne grave lors de sa mise en route a nécessité d'importants travaux et, au moment où nous traduisons (automne 2009), des premiers essais partiels viennent d'être réalisés qui laissent espérer une mise en service rapide. Le LHC permettra de faire circuler des faisceaux de protons circulant à 99,99... % de la vitesse de la lumière. Outre la détection éventuelle de la particule aujourd'hui seulement théorique qu'est le boson de Higgs, il pourrait aussi créer des mini-trous noirs, ce qui fait espérer une possibilité d'approche expérimentale des dimensions spatiales supplémentaires de la théorie des cordes. Sur les enjeux scientifiques du LHC, on peut consulter le site français du LHC (<http://www.lhc-france.fr>). (N.d.T.)

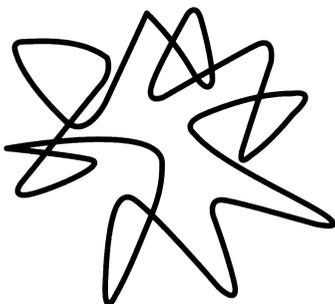
Si l'expérimentation ne peut nous dire si les particules possèdent des structures oscillantes périphériques, de haute fréquence, il nous faut faire appel à nos meilleures théories. Pendant la seconde moitié du XX^e siècle, le cadre mathématique le plus puissant pour l'étude des particules élémentaires a été la théorie quantique des champs. Il s'agit d'un sujet fascinant qui commence par postuler que les particules sont si petites qu'elles peuvent être considérées comme de simples points de l'espace. Mais cette façon de voir ne tarda pas à s'écrouler. Les particules se sont bien vite entourées d'autres particules qui vont et viennent, se promènent à des vitesses énormes. Ces nouveaux « promeneurs » sont eux-mêmes entourés de particules qui apparaissent et disparaissent encore plus rapidement. Prendre des photos à des vitesses d'obturation toujours plus grandes révélerait toujours davantage de structures à l'intérieur des particules – des particules oscillant de plus en plus rapidement, apparaissant et disparaissant. Un appareil lent voit une molécule comme une tache floue. Celle-ci n'apparaît comme un ensemble d'atomes que si la vitesse d'obturation est suffisamment rapide pour saisir les mouvements atomiques. Et l'histoire se répète au niveau atomique. Le flou des charges électriques autour du noyau requiert une expérience encore plus rapide pour distinguer les électrons. Dans les noyaux, il faut distinguer les protons et les neutrons, puis les quarks, et ainsi de suite.

Mais ces photos de plus en plus rapides ne nous révéleraient pas la caractéristique principale que nous recherchons : une structure en expansion qui occupe de plus en plus d'espace. Elles montreraient plutôt des particules de plus en plus petites formant une structure hiérarchisée semblable à celle des poupées russes (les poupées gigognes). Ce n'est pas ce dont nous avons besoin pour expliquer le comportement des particules près de l'horizon.

La théorie des cordes est beaucoup plus prometteuse. Ce qu'elle dit est tellement contre-intuitif que les physiciens, pendant des années, n'ont pas su quoi en faire. Les particules élémentaires décrites par la théorie des cordes – les prétendument minuscules boucles de cordes – sont exactement comme des hélices composées. Commençons avec une obturation lente. Une particule élémentaire ressemble presque à un point : pensez au moyeu. Accélérons maintenant l'obturateur pour qu'il reste ouvert un peu plus longtemps que le temps de Planck. L'image commence à révéler que la particule est une corde.



Augmentons encore la vitesse d'obturation. Ce qu'on voit est que chaque morceau de corde fluctue et vibre, ce qui fait que la nouvelle image paraît plus emmêlée et dispersée.



Mais cela ne s'arrête pas là et le processus se répète : chaque petite boucle, chaque pli de la corde se ramène à des boucles et tortillons fluctuant plus rapidement (voir ci-contre).

Que voit Bob quand il observe une particule semblable à une corde tomber vers l'horizon ? Au début, le mouvement oscillatoire est beaucoup trop rapide pour être distingué et tout ce qu'il voit est le minuscule centre, quelque chose dans le genre du moyeu. Mais, bientôt, la nature particulière du temps près de l'horizon commence à s'imposer et le mouvement de la corde s'avère ralentir. Peu à peu, toujours davantage de la structure oscillante apparaît à Bob, de la même façon que le faisait l'hélice composée d'Alice. À mesure que le temps passe, les oscillations encore plus rapides se révèlent et la corde paraît grandir et se disperser sur tout l'horizon du trou noir.

Mais qu'en est-il si l'on tombe à côté de la particule ? Les fluctuations de haute fréquence le restent, bien au-delà des capacités de notre appareil photo trop lent. Être près de l'horizon ne nous donne rien de mieux. Comme dans le cas de l'Avion d'Alice, nous ne voyons que le minuscule moyeu.

La théorie des cordes et la théorie quantique des champs ont ceci en commun que les choses apparaissent différentes à mesure



que la vitesse d'obturation augmente. Mais, en théorie quantique des champs, les objets ne grandissent pas. Ils semblent plutôt se briser en objets de plus en plus petits – poupées russes toujours plus petites. Mais, quand les constituants en arrivent à la longueur de Planck, un motif complètement nouveau émerge : celui de l'Avion d'Alice.

Dans l'allégorie de Russell Hoban *The Mouse and His Child*¹, il y a une amusante (et inattendue) métaphore sur la façon dont fonctionne la théorie quantique des champs. Lors de leurs aventures cauchemardesques, les souris mécaniques – père et fils –

1. Roman pour la jeunesse paru en 1967 et dans lequel une souris mécanique et son fils, après avoir été jetés dans une décharge, doivent fuir à travers le monde dans une quête pour ne plus dépendre de quelqu'un qui remonte leur mécanisme. L'ouvrage a été traduit en français par Valérie Mouriaux sous le titre *Souris, père et fils*, édité par Gallimard-Jeunesse (collection Folio-Junior). Un film d'animation a été réalisé d'après le roman en 1977. (N.d.T.)

découvrent une boîte de nourriture pour chiens infiniment captivante, précisément une boîte de Bonzo Dog Food. Sur l'étiquette de la boîte, l'image d'un chien tenant une boîte de Bonzo Dog Food, dont l'étiquette montre un chien tenant une boîte de Bonzo Dog Food, dont l'étiquette... Les souris scrutent toujours plus profondément dans une quête frustrante pour voir « le dernier chien visible », mais elles ne sont jamais sûres de l'avoir vu.

Des objets dans des objets dans des objets – c'est là toute l'histoire de la théorie quantique des champs. Mais, contrairement à l'étiquette de Bonzo, les choses bougent et, plus elles sont petites, plus vite elles se déplacent. Pour les voir, il vous faut donc à la fois un microscope plus puissant et un appareil photo toujours plus rapide. Mais remarquez une chose : ni la molécule dévoilée ni la boîte de Bonzo Dog Food ne s'avèrent grandir à mesure que davantage de structures sont découvertes.

La théorie des cordes est différente et fonctionne plus comme l'Avion d'Alice. En même temps que tout ralentit, toujours plus d'« hélices » filiformes apparaissent. Elles occupent un espace qui s'accroît pour que la structure complexe tout entière grandisse. Bien sûr, l'Avion d'Alice est une analogie, mais elle saisit vraiment de nombreuses propriétés mathématiques de la théorie des cordes. Les cordes, comme toute chose, ont des soubresauts quantiques, mais d'une façon spéciale. Tout comme l'Avion d'Alice, ou la version symphonique de son sifflet pour chiens, les cordes vibrent à de nombreuses fréquences différentes. La plupart de ces vibrations sont trop rapides pour être décelées, même aux grandes vitesses d'obturation fournies par les puissants accélérateurs de particules.

C'est en commençant à comprendre tout cela en 1993 que j'en ai fait de même du point faible de Hawking : pour la plupart des physiciens qui ont été formés à la théorie quantique des champs, l'idée de particules grandissantes, possédant des structures non bornées et trépidantes, était profondément étrangère. Par ironie, la seule autre personne qui avait fait allusion à une telle possibilité était le plus grand spécialiste du monde en théorie quantique des champs, mon compagnon d'armes, Gerard 't Hooft. Bien qu'il eût présenté cette idée à sa manière à lui – pas dans le langage de la théorie des cordes –, son travail exprimait aussi le sentiment que

les choses s'accroissent quand on les examine avec une résolution temporelle grandissante. Par contraste, la boîte à astuces de Hawking contenait l'étiquette de Bonzo Dog Food mais pas l'Avion d'Alice. Pour Stephen, la théorie quantique des champs, avec ses particules-points, était le *nec plus ultra* de la physique microscopique.

Compter les trous noirs

Un matin, alors que je descendais prendre mon petit déjeuner, mon épouse remarqua que mon T-shirt était devant derrière : la forme en V bâtie dans le tissu était dans mon dos. Le même jour, un peu plus tard, alors que je revenais d'un jogging, elle éclata de rire : « Et maintenant, il est à l'envers ! » Cela me fit me demander : combien y a-t-il de manières de porter un T-shirt ? Anne se moqua de moi : « Voilà bien le genre de questions idiotes que vous passez votre temps à vous poser, vous les physiciens ! » Juste pour prouver mon intelligence supérieure, j'affirmai très vite qu'il y a 24 façons de porter un T-shirt. Vous pouvez enfoncez la tête par n'importe lequel des 4 trous. Cela laisse 3 trous pour le torse. Une fois choisi un trou pour le cou et un autre pour le torse, il reste 2 possibilités pour le bras gauche. Une fois que vous avez décidé où vous mettez le bras gauche, il ne reste plus qu'un choix pour le droit. Ce qui fait $4 \times 3 \times 2 = 12$ façons de choisir. Mais comme vous pouvez retourner le T-shirt dedans dehors, ce qui fournit encore 12 choix, j'annonçai fièrement que j'avais résolu le problème : 24 façons de porter un T-shirt. Anne ne fut pas impressionnée. Elle répliqua : « Non, 25. Tu en as oublié une. » Perplexe, je demandai : « J'ai oublié laquelle ? » Elle me répondit d'un air féroce : « Tu peux le rouler en boule et te l'enfoncer... » Je n'insisterai pas¹...

Les physiciens (et les mathématiciens plus encore) sont très bons pour compter les choses – en particulier décompter des possi-

1. Depuis que j'ai écrit cela, Anne a trouvé au moins 10 autres façons de porter un T-shirt.

bilités. Ce dernier comptage est au cœur de la compréhension de l'entropie mais, dans le cas des trous noirs, que compte-t-on exactement ? Certainement pas le nombre de façons dont un trou noir peut porter un T-shirt !

Qu'est-ce qui rend le décompte des possibilités d'un trou noir si important ? Après tout, Hawking a déjà fourni la réponse quand il a calculé que l'entropie est égale à l'aire de l'horizon exprimée en unités d'aires de Planck. Mais il y avait une énorme confusion autour de l'entropie d'un trou noir. Laissez-moi vous rappeler pourquoi.

Stephen soutenait que le fait de voir l'entropie comme étant de l'information cachée – information qui pourrait être décomptée si l'on connaissait les détails – ne peut qu'être fausse dès lors qu'il est question de trous noirs. Il n'était pas vraiment le seul à dire cela. Presque tous les experts des trous noirs en étaient arrivés à la même conclusion : l'entropie d'un trou noir était quelque chose de différent, qui n'avait rien à voir avec le décompte des états quantiques.

Pourquoi Hawking et les relativistes avaient-ils une position aussi catégorique ? Le problème venait de l'argument convaincant de Stephen disant qu'on pouvait continuer à lancer toujours davantage d'informations dans un trou noir – comme comprimer un nombre infini de clowns dans une voiture de clowns – sans qu'aucune ne puisse s'échapper. Si l'entropie avait son sens usuel – le nombre total de bits possible pouvant être caché dans un trou noir –, il faudrait limiter la quantité d'information qui pourrait être cachée. Mais si un nombre infini de bits pouvait être perdus dans le trou noir, cela signifierait que le calcul de son entropie ne peut pas décompter toutes les possibilités cachées – et *cela* voudrait dire qu'il faudrait jeter de nouvelles bases révolutionnaires pour l'un des sujets de physique les plus anciens et les moins controversés : la thermodynamique. Il devenait donc urgent de savoir si l'entropie d'un trou noir décomptait vraiment ses configurations possibles.

Dans ce chapitre, je vais vous expliquer comment les théoriciens des cordes s'y sont pris pour ce décompte et comment, au passage, ils ont donné de solides bases quantiques à l'entropie de Bekenstein-Hawking – une base qui ne laissait aucune place pour la perte de l'information. Ce fut une avancée majeure, qui joua un grand rôle dans la ruine de l'affirmation de Stephen qu'une quantité illimitée d'informations pouvait être avalée par un trou noir.

Mais il me faut d'abord expliquer un point de vue suggéré au départ par 't Hooft.

La conjecture de 't Hooft

Il y a de nombreuses particules élémentaires différentes et je dois à la vérité de dire que les physiciens ne comprennent pas complètement ce qui les différencie les unes des autres. Mais, en laissant de côté les questions profondes, nous pouvons toujours faire un tour empirique à la fois des particules détectées expérimentalement et de celles dont on soupçonne l'existence pour des raisons théoriques. Une façon de les présenter est de les marquer sur un axe en traçant une sorte de spectre (pas à l'échelle) des particules élémentaires. La masse augmente quand on va vers la droite. Les lignes verticales indiquent des particules spécifiques.



À gauche, on trouve toutes les particules familières dont l'existence est certaine. Deux d'entre elles n'ont pas de masse et se déplacent à la vitesse de la lumière : le photon et le graviton. Puis viennent les différents types de neutrinos, l'électron, quelques quarks, le lepton mu (muon), quelques quarks supplémentaires, le boson W, le boson Z, le boson de Higgs et le lepton tau. Noms et détails n'ont pas d'importance.

Avec une masse un peu plus grande, il y a toute une collection de particules dont l'existence fait seulement l'objet d'une conjecture mais dont de nombreux physiciens (j'en fais partie) pensent qu'elles doivent exister¹. Pour des raisons qu'il n'y a pas lieu de discuter ici, ces particules hypothétiques sont appelées *superpartenaires*. Juste après, il y a un grand trou que j'ai indiqué par des points d'interrogation. Ce n'est pas que nous sachions qu'il y a un trou mais simplement que nous n'avons aucune raison de supposer qu'il y a des particules dans cette zone. En outre, aucun accélérateur ayant été construit ou même envisagé ne serait suffisamment

1. Nous le saurons bientôt grâce à l'accélérateur européen LHC.

puissant pour créer des particules d'une masse aussi grande. Le trou est donc une *terra incognita*.

Ensuite, avec des masses bien plus grandes que celles des superpartenaires, viennent les *particules de la grande unification*. Elles aussi sont conjecturales mais il y a de très bonnes raisons de croire qu'elles existent – selon moi meilleures encore que pour les superpartenaires. Reste que leur découverte sera au mieux indirecte.

Les particules les plus contestées de mon diagramme sont les modes d'excitation des cordes. D'après la théorie des cordes, il s'agit des *états excités* des particules ordinaires, très lourds, en rotation et en vibration. Enfin, tout en haut, la *masse de Planck*. Avant le début des années 1990, la plupart des physiciens se seraient attendus à ce que la masse de Planck ait représenté la fin du spectre des particules élémentaires. Mais Gerard 't Hooft voyait les choses autrement. Il soutint qu'il y avait certainement des objets dotés d'une masse plus grande. La masse de Planck, pour énorme qu'elle soit comparée à celle d'un électron ou d'un quark, est de l'ordre de celle d'un grain de poussière. Il existe évidemment des choses plus lourdes : boules de bowling, locomotives à vapeur et gâteaux de Noël aux fruits. Mais, parmi ces objets plus lourds, il y a le cas de ceux qui occupent la plus petite taille pour une masse donnée.

Prenez une pierre ordinaire d'une masse d'environ un kilogramme. Nous disons « solide comme le roc »... Mais, aussi solide soit-il, il est surtout composé de vide. Placez-le sous une pression convenable et il pourra être comprimé à une taille beaucoup plus petite. Avec une pression suffisante, une pierre pourrait être comprimée jusqu'à n'avoir que la taille d'une tête d'épingle, voire d'un virus. Et, même dans ce cas, elle serait composée essentiellement de vide.

Mais il y a une limite. Je ne parle pas d'une limite pratique due aux limitations de notre technologie actuelle. Je parle des lois de la nature et des principes fondamentaux de la physique. Quel est le diamètre du plus petit espace qu'un objet d'un kilogramme peut occuper ? La taille de Planck est une estimation évidente, mais ce n'est pas la bonne réponse. Un objet peut être comprimé jusqu'à ce qu'il devienne un trou noir dont la masse est d'un kilogramme¹ et

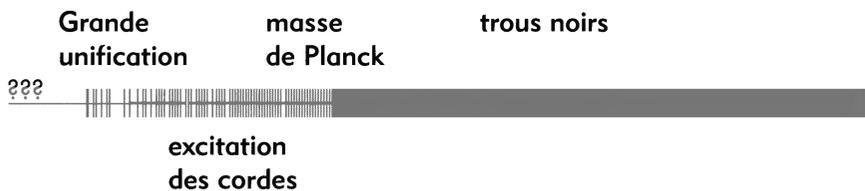
1. Il y a ici une subtilité technique. Comprimer une pierre ou un autre objet augmente son énergie et, puisque $E = mc^2$, cela augmente aussi sa masse. Mais nous pouvons compenser cela de différentes façons. Ce que nous voulons pour finir, c'est l'objet d'un kilogramme le plus petit possible.

ne peut pas l'être plus : c'est le plus petit, le plus dense objet possible pour une masse donnée.

Quelle est la taille d'un trou noir d'un kilogramme ? La réponse est probablement plus petite que vous ne le pensez. Le rayon de Schwarzschild (le rayon de l'horizon) d'un tel trou noir est d'environ cent millions de longueurs de Planck. Cela peut paraître grand mais, à dire vrai, c'est mille milliards de fois plus petit qu'un simple proton. Cela paraît aussi petit qu'une particule élémentaire : pourquoi ne pas l'inclure dedans ?

'T Hooft n'a fait que cela. En tout cas, il a dit qu'il n'y avait aucune raison importante de voir une différence fondamentale avec une particule élémentaire. Il a ensuite proposé l'audacieuse idée suivante :

Le spectre des particules ne s'arrête pas à la masse de Planck. Il se poursuit vers des masses arbitrairement grandes sous forme de trous noirs.



'T Hooft a aussi avancé que les trous noirs ne pouvaient avoir une masse quelconque mais, tout comme les particules ordinaires, leur masse ne peut prendre que des valeurs discrètes. Cependant, ces valeurs licites sur le spectre, au-delà de la masse de Planck, deviennent si proches les unes des autres, si denses qu'elles forment pratiquement une tache¹.

La transition depuis les particules ordinaires (ou les excitations de cordes) jusqu'aux trous noirs n'est pas aussi nette que ce

1. Pourquoi une telle densité ? À cause de l'entropie. Quand la masse augmente, il en est de même de l'horizon ; l'entropie du trou noir augmente donc aussi. Mais rappelez-vous : l'entropie, c'est de l'information cachée. Quand nous disons que la masse d'un trou noir est d'un kilogramme, nous voulons dire en réalité *approximativement* un kilogramme. Une affirmation plus précise serait que la masse est d'un kilogramme avec une certaine marge d'erreur. S'il y a plusieurs masses de trous noirs possibles à l'intérieur de cette marge d'incertitude, nous avons perdu beaucoup d'information dans notre description. Cette information manquante est l'entropie du trou noir. 'T Hooft savait que l'entropie d'un trou noir augmente avec sa masse et son raisonnement a été que le spectre des masses des trous noirs doit devenir une tache très dense.

que j'ai décrit sur la figure. Plus probablement, le spectre des excitations des cordes s'estompe en pénétrant à l'intérieur de celui des trous noirs près de la masse de Planck sans qu'il y ait une démarcation nette. C'était la conjecture de 't Hooft et, comme nous allons le voir, il y a de très bonnes raisons de la croire vraie.

Compter les cordes et les trous noirs

L'Avion d'Alice est une métaphore sur la façon dont les apparences sont ce que l'observateur veut qu'elles soient¹. Alice, depuis le cockpit, ne voit rien d'exceptionnel à l'horizon. Mais, vu de l'extérieur du trou noir, l'avion paraît avoir de plus en plus d'hélices qui, peu à peu, s'étalent sur l'horizon. L'Avion d'Alice est aussi une métaphore sur la façon dont fonctionne la théorie des cordes. Quand une corde tombe vers l'horizon, un observateur extérieur détectera de plus en plus de morceaux de cordes se matérialisant et remplissant l'horizon.

L'entropie des trous noirs implique qu'ils possèdent une sous-structure microscopique semblable aux molécules dans un bain d'eau chaude. Mais, en elle-même, l'existence de l'entropie ne recèle aucun indice sur la nature des « atomes d'horizon », bien qu'elle donne effectivement un décompte grossier de leur nombre.

Dans le monde d'Alice, les atomes d'horizon sont des hélices. Peut-être y a-t-il vraiment une théorie quantique de la gravité basée sur les hélices mais je pense que la théorie des cordes peut y prétendre à meilleur droit, en tout cas pour l'instant.

L'idée que les cordes possèdent une entropie remonte aux premiers temps de la théorie des cordes. Les détails sont mathématiques mais l'idée générale est facile à comprendre. Commençons par la corde la plus simple, représentant une particule élémentaire d'énergie donnée. Pour fixer les choses, disons un photon. La présence, ou l'absence, d'un photon est un unique bit d'information.

Mais faisons quelque chose à ce photon, présumant qu'il est vraiment une minuscule corde – on peut le secouer, ou le heurter avec d'autres cordes ou simplement le mettre dans une poêle à frire

1. « [...] appearances are in the eye of the beholder. » Il s'agit d'une paraphrase du proverbe : « Beauty is in the eye of the beholder », souvent traduit par : « Il n'y a pas de laides amours. » (*N.d.T.*)

chaude¹. Tout comme un petit élastique, il va se mettre à vibrer, tourner et se tendre. Si l'on ajoute assez d'énergie, il va se mettre à ressembler à un énorme fouillis enchevêtré : une pelote de fil que le chat va dénicher. Il ne s'agit pas de soubresauts quantiques mais *thermiques*.

Une pelote enchevêtrée de fil devient rapidement trop compliquée à décrire en détail mais nous aurions quand même des informations grossières. La longueur totale du fil serait d'une centaine de mètres. La pelote formerait une boule d'environ deux mètres de diamètre. Ce genre de description pourrait s'avérer utile même si elle omet les détails. Ces détails non spécifiés constituent l'information cachée qui donne à la balle de corde son entropie.

Énergie et entropie : voilà qui rappelle la chaleur. Et, en effet, les balles enchevêtrées de corde qui forment les particules élémentaires très excitées ont bien une température. Il s'agit là aussi de quelque chose de connu depuis les premiers temps de la théorie des cordes. De bien des façons, ces cordes enchevêtrées, excitées rappellent beaucoup les trous noirs. En 1993, je me demandais sérieusement si les trous noirs pouvaient n'être rien d'autre que d'énormes balles de cordes enchevêtrées de façon aléatoire. L'idée semblait intéressante, mais les détails étaient complètement faux.



Pelote de corde

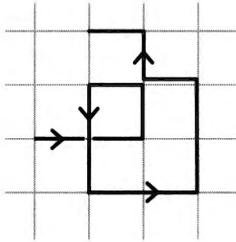


Trou noir

Par exemple, la masse (ou l'énergie) d'une corde est proportionnelle à sa longueur. Si une corde de 1 mètre a une masse de 1 gramme, 100 mètres de corde auront une masse de 100 grammes, 1 000 mètres une masse de 1 000 grammes.

1. Et faire monter la température à 10^{33} kelvins.

Mais l'entropie d'une corde est aussi proportionnelle à sa longueur. Imaginez que vous vous déplaçiez le long de la corde pendant qu'elle tourne et se tortille. Chaque tournant, chaque tortillon constitue un peu d'information. Une image simplifiée d'une corde est de supposer qu'il s'agit d'une série de liaisons rigides sur un treillis. Chaque liaison est horizontale ou verticale.



Commencez par une seule liaison : on peut la suivre vers le haut, vers le bas, vers la gauche ou la droite. Il y a quatre possibilités, ce qui est équivalent à deux bits d'information. Ajoutez maintenant une liaison : on peut continuer dans la même direction, tourner à angle droit (à gauche ou à droite) ou faire demi-tour. Ce qui fait deux bits de plus. Chaque liaison nouvelle ajoute ses deux bits. Cela signifie que l'information cachée est proportionnelle à la longueur totale de la corde.

Si à la fois la masse et l'entropie d'une corde enchevêtrée sont proportionnelles à sa longueur, nul besoin de mathématiques sophistiquées pour en déduire que l'entropie doit être proportionnelle à la masse :

$$\text{Entropie} \sim \text{Masse}$$

(La notation mathématique pour la proportionnalité est \sim .)

Nous savons que l'entropie d'un trou noir ordinaire augmente aussi avec sa masse. Mais il se trouve que la relation spécifique Entropie \sim Masse n'est *pas* la bonne pour les trous noirs. Pour le comprendre, contentez-vous de suivre cet enchaînement de proportionnalités : l'entropie est proportionnelle à l'aire de l'horizon ; cette dernière est proportionnelle au carré du rayon de Schwarzschild ; qui est proportionnel à la masse. Mettez le tout ensemble et vous obtenez que l'entropie est proportionnelle non pas à la masse mais *au carré de la masse* d'un trou noir.

Entropie ~ Masse².

Si la théorie des cordes est exacte, tout est fait de cordes. Et tout, ça veut dire *tout*, donc y compris les trous noirs. Cela a été pour moi, en cet été 1993, une déception, une source de frustration.

En fait, j'étais bête : j'avais oublié quelque chose d'évident mais cela ne m'est pas apparu avant le mois de septembre, quand je suis parti pour un mois dans le New Jersey. Deux des centres de physique théorique les plus importants, l'université de Rutgers et l'université de Princeton, sont dans le New Jersey, à une trentaine de kilomètres l'un de l'autre. Il était prévu que je donne une conférence dans chacun des deux dont le titre était : « Comment la théorie des cordes peut-elle expliquer l'entropie des trous noirs ». Au début, en organisant tout cela, j'avais pris un risque : j'espérais trouver ce qui n'allait pas bien avant la date des conférences.

Je ne sais pas si je suis le seul physicien à avoir le même cauchemar récurrent : je l'ai eu sous des formes variées depuis le début, il y a plus de quarante-cinq ans. Dans ce rêve, je suis supposé donner une conférence importante sur quelque recherche nouvelle mais, à mesure que la conférence approche, je me rends compte que je n'ai rien à dire. Je n'ai pas de notes et, parfois, je ne parviens même pas à me rappeler le sujet. Tension et panique s'installent. Parfois, je me retrouve devant l'assistance en sous-vêtements, voire, pis encore, sans sous-vêtements.

Cette fois, il ne s'agissait pas d'un rêve. Je devais faire la première des deux conférences à Rutgers. Le jour approchait et ma tension grandissait à chercher comment corriger mon histoire, mais elle persistait à être erronée. Puis, alors qu'il ne me restait qu'à peu près trois jours à y consacrer, je me suis rendu compte de ma propre stupidité : j'avais complètement oublié la gravité.

Celle-ci agit pour attirer les objets les uns vers les autres et les rassembler. Prenez un énorme rocher – par exemple la Terre. Sans gravité, elle se contenterait de rester assemblée comme n'importe quel rocher. Mais la gravité a un effet puissant : elle attire toutes les parties de la Terre et comprime le cœur, réduisant ses dimensions. La force d'attraction gravitationnelle a un autre effet : elle modifie la masse de la Terre. L'énergie potentielle négative due à la gravité enlève un peu de la masse de la Terre. Sa masse réelle est un peu plus petite que la somme de ses parties.

Il faudrait que je m'arrête ici et explique ce fait pas très intuitif. Retournons voir un moment ce pauvre Sisyphé qui pousse son

rocher en haut de la montagne pour simplement le voir rouler en bas. Le cycle de Sisyphe de conversion de l'énergie est le suivant :

chimique → potentielle → cinétique → thermique

Oubliez pour l'instant l'énergie chimique (le miel que Sisyphe a mangé) et commençons le cycle par l'énergie potentielle du rocher en haut de la montagne. L'eau qui se trouve en haut des chutes du Niagara possède aussi de l'énergie potentielle et, dans les deux cas, en même temps que la masse tombe à une altitude plus basse, l'énergie potentielle diminue. Finalement, elle est convertie en chaleur mais imaginez que celle-ci s'évacue par rayonnement dans l'espace. Le bilan est que rocher et eau ont perdu de l'énergie en perdant de l'altitude.

C'est exactement la même chose qui arrive à la matière dont est faite la Terre si elle est comprimée (par gravité) plus près de son centre : elle perd de l'énergie potentielle. Cette énergie perdue ressort sous forme de chaleur qui finit par s'échapper par rayonnement dans l'espace. Bilan : la Terre a connu une perte nette d'énergie et, par suite, une perte nette de masse.

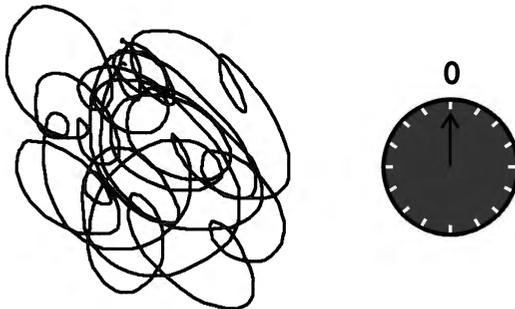
C'est ainsi que j'en vins à soupçonner que la masse d'une longue corde enchevêtrée pourrait aussi être amoindrie par gravité et ne pas être proportionnelle à la longueur une fois correctement pris en compte les effets de la gravité. Voici l'expérience de pensée que j'imaginai. Supposons que nous ayons un bouton de réglage permettant d'augmenter ou diminuer l'intensité de la gravité. Tournons le bouton pour diminuer la gravité et la Terre va se dilater légèrement, devenant un peu plus lourde. Tournons le bouton dans l'autre sens pour augmenter la gravité : la Terre rétrécirait et deviendrait un peu plus légère. Tournons encore plus et la gravité deviendra encore plus forte. Finalement, elle deviendrait si forte que la Terre s'effondrerait pour devenir un trou noir. Mais, et c'est le plus important, la masse du trou noir serait *plus petite* d'une bonne quantité que la masse originelle de la Terre.

La boule géante de corde que j'imaginai connaîtrait le même sort. J'avais oublié de tourner le bouton de réglage de la gravité quand je réfléchissais au lien entre boules de corde et trous noirs. Un soir donc où je n'avais rien à faire – rappelez-vous : j'étais au centre du New Jersey –, je tournai en imagination le bouton pour augmenter la gravité. Toujours en imagination, je pouvais voir une boule de corde se comprimer en une sphère serrée et rapetissée.

Mais, plus important, je me rendis compte que la nouvelle boule de corde plus petite aurait aussi une masse beaucoup plus petite qu'au départ.

Il y avait plus. Si, dans la boule de corde, taille et masse changeaient, n'en serait-il pas de même de l'entropie ? Par chance, l'entropie est précisément ce qui *ne change pas* quand on tourne doucement le bouton. C'est peut-être la chose la plus basique concernant l'entropie : si vous modifiez un système lentement, l'énergie peut être modifiée (et, d'ordinaire, elle l'est), mais l'entropie reste exactement ce qu'elle était. Cette base à la fois de la mécanique classique et de la mécanique quantique est appelée le *théorème adiabatique*.

Recommençons l'expérience de pensée en remplaçant la Terre par un gros enchevêtrement de corde. Commençons avec le bouton de gravité à zéro.



Gravité

Sans gravité, la corde ne ressemble pas à un trou noir, mais elle a entropie et masse. Puis tournons doucement le bouton. Les différentes parties de la corde commencent à se tirer les unes les autres et la boule de corde se comprime.



Continuons à augmenter la gravité jusqu'à ce que la corde devienne si compacte qu'elle forme un trou noir.



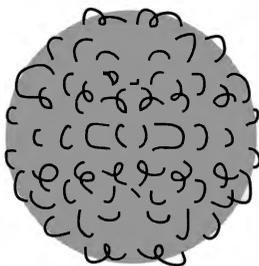
Gravité

Masse et taille ont été réduites mais, et c'est là le point important, l'entropie n'a pas changé. Que se passe-t-il si l'on ramène le bouton à zéro ? Le trou noir commence à gonfler et finit par redevenir une grosse boule de corde. En tournant doucement le bouton dans un sens ou dans l'autre, l'objet prend alternativement la forme d'une grosse boule de corde à l'enchevêtrement lâche et d'un trou noir comprimé de façon bien serrée. Mais tant qu'on tourne le bouton lentement, l'entropie reste la même.

Puis, en un instant du genre « bon sang, mais c'est bien sûr », je me rendis compte que le problème avec la représentation balle-de-corde d'un trou noir ne venait pas de l'entropie : c'est la masse qu'il fallait corriger pour tenir compte des effets de la gravité. Quand je fis les calculs sur un bout de papier, tout se mit en place. Pendant que la balle de corde rétrécit jusqu'à se transformer en trou noir, la masse se transforme exactement comme il faut. À la fin, entropie et masse sont dans la relation correcte $\text{Entropie} \sim \text{Masse}^2$.

Mais le calcul restait, de façon agaçante, incomplet. Rappelez-vous le fait que la petite ondulation (\sim) veut dire « proportionnel à », pas « égal à ». L'entropie était-elle égale précisément au carré de la masse ? Au double ?

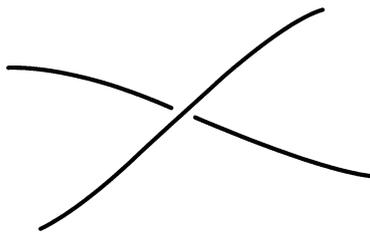
L'image de l'horizon du trou noir qui se formait était un enchevêtrement de corde aplani sur l'horizon par la gravité. Mais les mêmes fluctuations quantiques que Feynman et moi-même avions imaginées au West End Café en 1972 feraient sortir un peu quelques morceaux de la corde et ce sont ces morceaux qui constitueraient les mystérieux atomes d'horizon. En gros, quelqu'un en dehors du trou noir pourrait détecter des morceaux de corde, chacun avec ses deux extrémités solidement attachées à l'horizon. En langage de la théorie des cordes, les atomes d'horizon sont des cordes ouvertes (des cordes avec extrémités) attachées à une sorte de membrane. En fait, ces morceaux de cordes pourraient se détacher par force de l'horizon, ce qui expliquerait comment un trou noir rayonne et s'évapore.



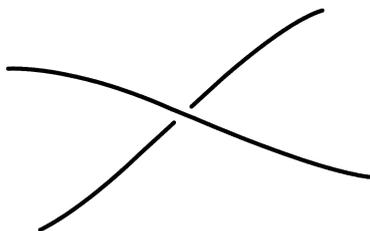
Il semble que John Wheeler avait tort : les trous noirs *ont des poils*. Le cauchemar était fini : j'avais une conférence à donner.

Cordes croisées

Les cordes fondamentales peuvent se passer à travers les unes des autres. La figure suivante en montre un exemple. Regardez la corde la plus proche comme s'éloignant de vous et la plus éloignée comme se rapprochant de vous : à un certain moment, elles vont se croiser et, s'il s'agissait de tendeurs ordinaires, elles se colleraient.

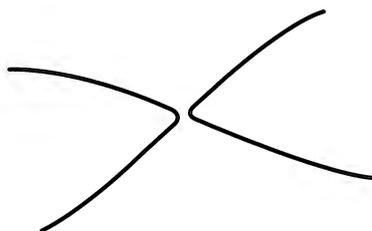


Mais les règles mathématiques de la théorie des cordes leur permettent de se passer à travers pour se retrouver comme dans l'image suivante.



Pour obtenir cela avec des tendeurs véritables, vous auriez dû en découper un et le recoller après le croisement.

Mais autre chose peut se produire quand les cordes se touchent : au lieu de se traverser mutuellement, elles peuvent se combiner autrement pour ressortir ainsi :



Pour obtenir cela avec des tendeurs, il aurait fallu les couper tous les deux et les recoller autrement.

Laquelle de ces deux éventualités se produit-elle quand deux cordes se croisent ? La réponse est tantôt l'une, tantôt l'autre. Les cordes fondamentales sont des objets quantiques et, en mécanique quantique, rien n'est sûr – tout est possible, mais avec des probabilités bien définies. Par exemple, les cordes pourraient se traverser dans 90 % des cas. Les 10 % restants, elles se recombinent. La probabilité qu'elles se recombinent est appelée *constante de couplage des cordes*.

Munis de ce savoir, concentrons-nous sur un petit morceau de corde pointant hors de l'horizon d'un trou noir. Le petit segment de corde fait un tortillon et il est sur le point de se croiser lui-même.



90 % du temps, il se traverse lui-même et presque rien ne se passe.



Mais 10 % du temps, il se recombine et, quand il le fait, quelque chose de nouveau se produit : une petite boucle de corde s'échappe.



Ce petit morceau de corde fermée est une particule. Cela pourrait être un photon, un graviton ou n'importe quelle autre particule. Du fait qu'il est en dehors du trou noir, il a une chance de s'échapper et, lorsqu'il le fait, le trou noir perd un peu d'énergie. Voilà comment la théorie des cordes explique le rayonnement de Hawking.

Retour dans le New Jersey

Les physiciens du New Jersey formaient un groupe qui avait la tête froide. Edward Witten, le leader intellectuel de l'Institute for Advanced Study de Princeton, n'est pas seulement un grand physicien mais aussi un des plus grands mathématiciens du monde. Certains diraient que causerie et vaines spéculations ne sont pas son fort (bien que je trouve son côté pince-sans-rire et sa grande curiosité très agréables), mais tout le monde est d'accord sur sa rigueur intellectuelle. Je ne parle pas d'une rigueur mathématique superflue mais plutôt de raisonnements clairs, prudents, bien conçus. Parler de physique avec Witten peut être parfois très éprouvant, mais c'est toujours enrichissant.

À Rutgers, le discours intellectuel était aussi d'une qualité exceptionnelle. On y trouvait six physiciens théoriciens accomplis, chacun d'entre eux étant largement admiré, surtout par les théoriciens des cordes mais aussi dans la communauté plus étendue de la physique. Tous étaient mes amis mais trois d'entre eux l'étaient tout particulièrement. J'avais connu Tom Banks, Steve Shenker et Nathan « Nati » Seiberg à l'époque où ils étaient de très jeunes physiciens et j'avais énormément apprécié leur compagnie. Ces six

physiciens de Rutgers étaient intellectuellement formidables. Les deux établissements étaient connus pour ne pas vous laisser sortir avec des idées inachevées.

Bien sûr, je savais que mes propres raisonnements étaient loin d'être complètement achevés. La complémentarité du trou noir, l'Avion d'Alice et les métamorphoses de cordes en trous noirs et vice versa, le tout avec des estimations grossières : ma représentation semblait tenir debout. Mais les outils pour faire de ces idées des mathématiques rigoureuses n'étaient pas disponibles en 1993. Néanmoins, les idées que je défendais ont trouvé un écho au sein de ce robuste groupe de physiciens du New Jersey. En particulier, la réponse de Witten fut d'accepter plus ou moins facilement la proposition que l'horizon d'un trou noir est composé de morceaux de corde. Il a même résolu la façon dont les cordes s'évaporent de façon semblable à l'évaporation d'un trou noir. Shenker, Seiberg, Banks et leur collègue Michael Douglas firent tous d'utiles suggestions sur la façon de rendre ces idées plus précises.

Dans le New Jersey, il y avait aussi un théoricien des cordes de passage que je ne connaissais pas très bien. Cumrun Vafa, un jeune professeur de Harvard, était venu d'Iran aux États-Unis pour étudier la physique à Princeton. En 1993, il était reconnu comme l'un des théoriciens de la physique parmi les plus créatifs et mathématiquement les plus fins du monde. Au départ théoricien des cordes, il en savait pas mal sur les trous noirs et il s'est trouvé qu'il était dans l'assistance à Rutgers quand j'ai expliqué comment l'entropie des trous noirs pourrait être à l'origine de la nature fibreuse de l'horizon. La conversation que nous eûmes ensuite fut décisive.

Trous noirs extrémaux

À l'époque de ces conférences, on avait compris que, si un électron était jeté dans un trou noir, ce dernier se chargerait électriquement. La charge électrique, qui se disperse rapidement sur l'horizon, sera à l'origine d'une répulsion qui repoussera un peu l'horizon.

Mais il n'y avait aucune raison d'en rester à un seul électron. L'horizon pourrait être aussi chargé électriquement qu'on le veut. Plus il est chargé, plus il s'éloigne de la singularité.

Cumrun Vafa fit remarquer qu'il y a une espèce très particulière de trou noir chargé qui est en équilibre parfait entre attraction gravitationnelle et répulsion électrique. Un tel trou noir est qualifié d'*extrémal*. Selon Vafa, les trous noirs extrémaux seraient un laboratoire parfait pour tester mes idées. Il avança qu'ils pourraient constituer la clef pour un calcul plus exact dans lequel un solide signe égale (=) remplacerait l'évasif signe de proportionnalité (~).

Poussons un peu plus loin cette idée d'un trou noir électriquement chargé. Les boules de charges électriques ne sont en général pas stables. Du fait que les électrons se repoussent (rappelez-vous la règle : les charges de même signe se repoussent ; celles de signe opposé s'attirent), s'il arrive qu'un nuage de charges se forme, il se dispersera en général instantanément à cause de la répulsion électrique. Mais la gravité peut compenser cette dernière si la boule de charges est suffisamment massive. Puisque tout, dans l'univers, s'attire du fait de la gravité, il y aura compétition entre gravité et répulsion électrique – la gravité attirant les charges les unes vers les autres, les forces électriques les faisant se repousser. Un trou noir chargé est le siège d'une lutte acharnée.

Si la boule de charges est très massive mais que sa charge électrique est petite, la gravité l'emportera et la boule se contractera. Si elle a une masse petite mais une charge électrique très grande, c'est la répulsion électrique qui s'imposera et la boule gonflera. Il y a un point d'équilibre quand charge et masse sont exactement dans les bonnes proportions. Dans ce cas, répulsion électrique et attraction gravitationnelle se compensent l'une l'autre et il y a match nul. C'est très exactement ce qu'est un trou noir extrémal.

Imaginons maintenant que nous ayons deux boutons, l'un pour la gravité, l'autre pour la force électrique. Au départ, les deux boutons sont activés. Quand la gravité et la force électrique sont en parfait équilibre, nous avons un trou noir extrémal. Si nous baissons la gravité sans toucher à la force électrique, celle-ci commencera à l'emporter dans la lutte sans merci. Mais si nous baissons les deux de la même façon, l'équilibre sera préservé. Chaque camp faiblira mais aucun ne prendra l'avantage.

Finalement, si nous mettons les boutons à zéro, les forces gravitationnelles et électriques disparaîtront. Qu'est-ce qui reste ? Une corde sans aucune tension entre ses différentes parties. À travers l'ensemble du processus, l'entropie n'a pas changé. Mais le point important est que la masse non plus n'a pas changé. L'annulation

des forces électrique et gravitationnelle « n'a pas fonctionné », ce qui est une façon technique de dire que l'énergie est restée exactement ce qu'elle était au départ.

Vafa avançait que, *si* nous savions comment réaliser un tel trou noir extrémal en théorie des cordes, nous pourrions l'étudier avec une grande précision quand les boutons sont activés ou, au contraire, hors marche. Il expliqua qu'il serait alors possible, en utilisant la théorie des cordes, de calculer le facteur numérique précis que j'avais été incapable de trouver. Pour mélanger les métaphores, calculer le facteur numérique exact devint le Saint-Graal des théoriciens des cordes et la façon de compléter les bases de mon idée. Mais personne ne savait comment assembler les bonnes sortes de trous noirs chargés en dehors des composants fournis par la théorie des cordes.

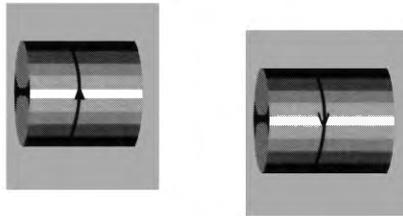
La théorie des cordes est un peu comme un jeu de construction Tinkertoy très compliqué avec beaucoup de pièces différentes qui peuvent s'ajuster pour former des configurations cohérentes. Je vous parlerai un peu tout à l'heure de ces « poulies et pignons » mathématiques mais, en 1993, des pans entiers nécessaires pour bâtir un trou noir extrémal restaient à découvrir.

Le physicien indien Ashoke Sen a été le premier à essayer de construire un trou noir extrémal et à tester la théorie des cordes de l'entropie d'un trou noir. En 1994, il est parvenu très près du but mais pas assez pour achever la quête. Sen est tenu en haute estime au sein des théoriciens de la physique. Il a la réputation d'être à la fois un penseur profond et, techniquement, un virtuose. Les conférences de Sen – cet homme timide et frêle avec son accent bengali fort et mélodieux – sont célèbres pour leur clarté. Avec une technique pédagogique parfaite, il écrit au tableau tout concept nouveau. Les idées se déroulent en suivant un enchaînement inéluctable qui rend les choses claires comme de l'eau de roche. Ses articles scientifiques ont la même limpidité.

Je ne savais pas que Sen travaillait sur les trous noirs. Mais, de retour aux États-Unis après mon voyage à Cambridge, quelqu'un – Amanda Peet, je crois – me tendit un de ses articles. Il était long et technique mais, dans les derniers paragraphes, Ashoke utilisait les idées de la théorie des cordes – celles que j'avais décrites à Rutgers – pour calculer l'entropie d'une nouvelle classe de trous noirs extrémaux.

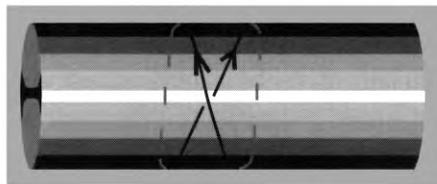
Le trou noir de Sen était fait des morceaux de ce que nous connaissions autour de 1993 : les cordes fondamentales et les six dimensions supplémentaires de l'espace. Ce que Sen fit ensuite

était une simple mais très claire prolongation de mes propres idées antérieures. Son innovation principale a été de commencer avec une corde qui n'était pas seulement très excitée mais était aussi enroulée plusieurs fois autour d'une direction compacte. Dans le monde simplifié du cylindre – la version épaissie de Lineland –, une corde enroulée ressemble à un élastique tendu autour d'un morceau de tuyau en plastique.

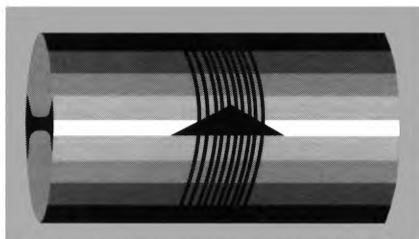


Une telle corde est plus lourde qu'une particule ordinaire parce qu'il faut de l'énergie pour la serrer autour du cylindre. En théorie des cordes typique, la masse de la corde enroulée peut représenter quelques pour cent de la masse de Planck.

Puis Sen a pris une seule corde et l'a enroulée deux fois autour du cylindre.



Un théoricien des cordes dirait que cette corde est d'*indice 2* et qu'elle est encore plus lourde que la corde à un tour. Mais que se passe-t-il si la corde est enroulée autour de la direction compacte de l'espace non pas une fois ou deux mais des milliards de fois ?



Il n'y a pas de limite au nombre de tours que la corde peut faire autour de la direction compacte de l'espace. À la fin, elle peut être devenue aussi lourde qu'une étoile ou même une galaxie. Mais la place qu'elle occupe dans l'espace ordinaire – les dimensions non compactes de l'espace tridimensionnel ordinaire – est petite. Une telle masse confinée dans un espace aussi petit ne peut être qu'un trou noir.

Sen ajouta une autre astuce, le seul ingrédient qui restait dans la théorie des cordes autour de 1993 : des ondulations se déplaçant autour de la corde. De l'information pouvait être cachée dans les détails des ondulations, exactement comme je l'avais avancé une année plus tôt.

Des ondulations sur une corde élastique ne se tiennent pas tranquilles. Elles circulent le long de la corde comme des ondes, certaines se déplaçant dans le sens horaire, d'autres dans le sens anti-horaire. Deux ondulations se déplaçant dans la même direction se poursuivent sans jamais entrer en collision. Mais, si elles se déplacent dans des directions opposées, elles se cogneront, produisant un désordre compliqué. Sen a donc choisi de stocker toute l'information cachée dans des ondes se déplaçant dans le sens horaire en bon ordre sans jamais entrer en collision.

Quand il eut rassemblé tous les ingrédients et tourné divers boutons, la corde de Sen ne pouvait rien faire d'autre que se transformer en trou noir. Mais, au lieu d'un trou noir ordinaire, l'étirement autour de la direction circulaire compacte donnait naissance à un trou noir extrémal très particulier.

Les trous noirs extrémaux sont électriquement chargés. Où se trouve la charge électrique ? On connaissait la réponse depuis des années : une corde qui est enroulée autour d'une direction compacte acquiert une charge électrique : elle gagne une unité de charge à chaque tour. Quand la corde est enroulée dans un sens, la charge est positive et elle est négative quand c'est dans l'autre sens. On peut aussi voir la corde géante de Sen multi-enroulée comme une boule de charges électriques maintenues ensemble par la gravité – autrement dit un trou noir chargé.

L'aire est un concept géométrique et la géométrie de l'espace et du temps est régie par la relativité générale d'Einstein. La seule façon de connaître l'aire de l'horizon d'un trou noir est de la trouver à partir des équations de la relativité d'Einstein. Sen, en grand maître de ces équations, les a résolues facilement (pour

lui...) dans le cas particulier de l'espèce de trou noir qu'il avait concoctée et a ainsi calculé l'aire de l'horizon.

Catastrophe ! Une fois les équations résolues et l'aire de l'horizon calculée, le résultat a été... *zéro* ! En d'autres termes, au lieu d'être une belle et grande coquille, l'horizon s'était rétréci à la taille d'un simple point de l'espace ! Toute l'entropie stockée dans ces cordes sinueuses, ondulantes était apparemment concentrée en un minuscule point de l'espace. Ce n'était pas seulement un problème pour les trous noirs : cela contredisait aussi le principe holographique : l'entropie maximale d'une région de l'espace est son aire en unités de Planck. Quelque chose clochait.

Sen savait exactement où était le problème. Les équations d'Einstein sont *classiques*, ce qui signifie qu'elles ignorent les effets des fluctuations quantiques. Sans ces dernières, l'électron d'un atome d'hydrogène tomberait dans le noyau et l'atome tout entier ne serait pas plus grand qu'un proton. Mais le mouvement quantique au point zéro, conséquence du principe d'incertitude, rend les atomes cent mille fois plus grands que le noyau. Sen s'est rendu compte que la même chose devait se produire pour l'horizon. Bien que la physique classique prédise qu'il devrait se réduire à un point, les fluctuations quantiques le font grandir à ce que j'ai appelé l'*horizon étiré*.

Sen fit les corrections nécessaires : une estimation « à la louche » montrait que l'entropie et l'aire de l'horizon étiré étaient en fait proportionnelles. C'était un nouveau triomphe pour la théorie des cordes de l'entropie de l'horizon mais, comme précédemment, elle était incomplète : l'estimation restait vague ; il y avait une incertitude sur la quantité exacte dont l'horizon serait étiré par les fluctuations quantiques. Aussi brillant qu'il fût, le travail de Sen s'achevait encore avec un évasif \sim . Ce qu'il pouvait dire de mieux était que l'entropie d'un trou noir était *proportionnelle* à l'aire de l'horizon. C'était presque ça, mais pas tout à fait ! Le calcul-estocade restait encore à faire...

Il n'y avait aucune chance pour que ce quasi-calcul convainque Stephen Hawking – pas plus que ne l'avaient fait mes arguments. Néanmoins, le cercle se resserrait. Pour mettre à exécution la proposition de Vafa et réaliser un trou noir avec un grand horizon classique, de nouvelles pièces de Tinkertoy s'avéraient nécessaires. Heureusement, elles étaient sur le point d'être découvertes à Santa Barbara.

Les D-branes de Polchinski

Les D-branes devraient s'appeler P-branes – P pour Polchinski. Mais au moment où Joe découvrit ses branes, le terme *P-brane* était déjà utilisé pour quelque chose sans rapport. Joe les a donc appelées *D-branes*, d'après le nom du mathématicien allemand du XIX^e siècle Johann Dirichlet. Ce dernier n'avait rien à voir directement avec les D-branes mais ses travaux mathématiques sur les ondes avaient un certain rapport.

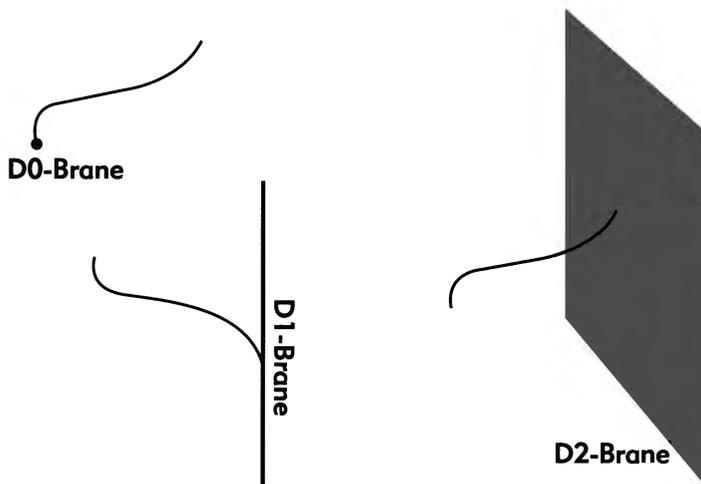
Le mot *brane* ne se trouve pas dans le dictionnaire en dehors du contexte de la théorie des cordes. Il vient du terme usuel *membrane*, une surface bidimensionnelle qui peut être recourbée et étirée. La découverte en 1995 par Polchinski des propriétés des D-branes a été l'un des événements les plus importants de l'histoire récente de la physique. Elle devait bientôt avoir de profondes répercussions sur tout depuis les trous noirs jusqu'à la physique nucléaire.

Les branes les plus simples sont des objets de dimension 0 appelés 0-branes. Une particule, ou un point de l'espace, est de dimension 0 – il n'y a aucun endroit où déplacer ce point : c'est pourquoi particule et 0-brane sont synonymes. En montant d'un cran, nous trouvons les 1-branes, qui ont une dimension. Une corde fondamentale est un cas particulier de 1-brane. Les membranes – les pièces de matière bidimensionnelles – sont des 2-branes. Qu'en est-il des 3-branes – sont-elles du même genre ? Pensez à un cube solide de caoutchouc remplissant une portion de l'espace. Vous pouvez dire qu'il s'agit d'une *3-brane remplissant l'espace*.

Il apparaît maintenant que nous commençons à manquer de directions. À l'évidence, il n'y a aucun moyen d'ajuster une 4-brane dans un espace tridimensionnel. Mais que dire si l'espace possède des dimensions compactes – six, par exemple ? Dans ce cas, une des directions dans une 4-brane peut s'étendre dans les directions compactes. En fait, s'il y a au total neuf dimensions, l'espace peut contenir n'importe quel type de brane jusque et y compris des 9-branes.

Une D-brane n'est pas n'importe quelle sorte de brane. Elle a une propriété très particulière – précisément que des cordes fondamentales peuvent y avoir une extrémité. Prenez le cas de la D0-brane. Le D signifie qu'il s'agit d'une D-brane et le 0 qu'elle est de

dimension 0. Ainsi, une D0-brane est une particule sur laquelle une corde fondamentale peut avoir une extrémité.



Les D1-branes sont souvent appelées D-cordes. Cela vient de ce qu'une D1-brane, puisqu'elle est unidimensionnelle, est elle-même une sorte de corde, même si l'on ne doit pas confondre avec une corde fondamentale¹. Typiquement, les D-cordes sont beaucoup plus lourdes que les cordes fondamentales. Les D2-branes sont des membranes, semblables à des pièces de caoutchouc mais, encore une fois, avec cette propriété que des cordes fondamentales peuvent y avoir une extrémité.

Les D-branes étaient-elles une lubie, un ajout arbitraire fait par Polchinski à la théorie des cordes simplement parce que c'était possible ? Je pense que, dans son premier travail exploratoire, c'était peut-être le cas. Les théoriciens de la physique inventent souvent de nouveaux concepts dans le seul but de jouer avec et de voir où ils mènent. Effectivement, plus tôt, en 1994, quand Joe me fit part pour la première fois du concept de D-brane, c'était précisément dans cet esprit : « Regarde ! On peut ajouter de nouveaux

1. Il peut paraître curieux et, d'une certaine manière, arbitraire qu'il y ait deux sortes de cordes en théorie des cordes. En fait, cela n'a rien d'arbitraire. Il y a de puissantes symétries mathématiques, appelées dualités, liant les cordes fondamentales et les D-cordes. Ces dualités sont très semblables à celle qui lie les charges électriques et les monopôles magnétiques dont l'existence a été supposée pour la première fois par Paul Dirac en 1931. Elles ont eu une influence profonde sur plusieurs sujets de mathématiques pures.

objets à la théorie des cordes. C'est drôle ! Voyons un peu leurs propriétés. »

Mais, à un moment de 1995, Joe s'est rendu compte que les D-branes remplissaient un énorme trou mathématique de la théorie des cordes. Leur existence était, en fait, nécessaire pour compléter une toile grandissante de logique et de mathématiques. Et les D-branes étaient l'ingrédient secret manquant nécessaire pour construire un meilleur trou noir extrémal.

Les mathématiques de la théorie des cordes portent leurs fruits

En 1996, Vafa et Andy Strominger ont fait un bond en avant. En combinant cordes et D-branes, ils ont été capables de construire un trou noir extrémal avec un grand horizon classique sans équivoque. Le trou noir extrémal étant vu comme un grand objet classique, les soubresauts quantiques n'avaient qu'un effet négligeable sur l'horizon. Là, pas de place pour les ondulations. La théorie des cordes avait intérêt à fournir la bonne quantité d'information cachée telle qu'elle ressort de la formule de Hawking, sans un équivoque facteur multiplicatif du genre 2 ou π , et sans signe de proportionnalité.

Il ne s'agissait pas d'un bon vieux trou noir. L'objet que Strominger et Vafa avaient tiré des cordes et des D-branes ressemblait à un cauchemar technique mais c'était la construction la plus simple qui possédait le grand horizon classique qu'ils recherchaient. Il y fallait toutes les astuces mathématiques de la théorie des cordes, y compris la panoplie complète des dimensions supplémentaires, les D-branes et bien d'autres choses encore. Tout d'abord, ils ont planté le nombre de D5-branes qui remplissaient cinq des six directions compactes de l'espace. Par-dessus cela, incrustées dans les D5-branes, ils ont enroulé un grand nombre de D1-branes autour d'une des directions compactes. Puis ils ont ajouté des cordes attachées par leurs deux extrémités aux D-branes. Encore une fois, des bouts ouverts de corde constitueraient les atomes d'horizon qui contiennent l'entropie. (Si vous êtes un peu perdu, ne vous inquiétez pas : nous avons pénétré dans une zone où l'esprit humain n'est pas programmé pour comprendre facilement ce qui s'y passe.)

Strominger et Vafa suivirent les mêmes étapes que celles qui avaient déjà été suivies précédemment. Ils commencèrent par mettre les boutons à zéro pour faire disparaître la gravité et les autres forces : sans ces forces pour tout embrouiller, il était possible de calculer exactement la quantité d'entropie stockée dans les fluctuations des cordes ouvertes. Les aspects techniques des calculs étaient plus compliqués et subtils que tout ce qu'on avait pu faire jusqu'alors mais, par un tour de force mathématique, ils ont réussi.

L'étape suivante a été de résoudre l'équation de champ d'Einstein pour cette sorte de trou noir extrémal. Cette fois, nul besoin de procédure d'étirement incertain pour calculer l'aire. Pour leur plus grande satisfaction (et la mienne), Strominger et Vafa trouvèrent que l'aire de l'horizon et l'entropie ne se contentaient pas d'être proportionnelles : l'information cachée dans les ondulations filiformes attachées aux branes correspondait exactement à la formule de Hawking. Ils la tenaient !

Comme cela arrive souvent, plusieurs groupes travaillent sur la même idée nouvelle presque simultanément. Au moment même où Strominger et Vafa planchaient sur leur travail, un des physiciens les plus brillants de la nouvelle génération étudiait à Princeton. Le directeur de thèse de Juan Maldacena était Curt Callan (le C de CGHS). Maldacena et Callan eux aussi entassaient ensemble des D5-branes, des D1-branes et des cordes ouvertes. À quelques semaines de Strominger et Vafa, ils ont envoyé leur propre article. Leurs méthodes étaient un peu différentes mais leurs conclusions confirmaient pleinement ce que Strominger et Vafa avaient affirmé.

En fait, Callan et Maldacena pouvaient aller un peu au-delà des précédents travaux et s'essayer aux trous noirs légèrement non extrémaux. Un trou noir extrémal est une bizarrerie en physique. C'est un objet qui possède de l'entropie mais sans chaleur ni température. Dans la plupart des systèmes quantiques, une fois que l'énergie est évacuée, tout est rigidement figé sur place. Par exemple, si l'on enlevait toute chaleur d'un cube de glace, le résultat serait un cristal parfait sans aucune imperfection. Tout réaménagement des molécules d'eau utiliserait de l'énergie et, par suite, ajouterait un peu de chaleur. La glace dont on a retiré toute chaleur n'a aucune énergie en trop, aucune température, aucune entropie.

Mais il y a des exceptions. Certains systèmes particuliers possèdent de nombreux états avec exactement la même valeur minimale d'énergie. En d'autres termes, une fois que toute l'énergie a

été évacuée, il y a des façons de réaménager le système pour cacher l'information et cela sans ajouter de l'énergie. Les physiciens disent de tels systèmes qu'ils ont des *états fondamentaux dégénérés*. De tels systèmes ont de l'entropie – ils peuvent cacher de l'information – même au zéro absolu. Les trous noirs extrémaux sont de parfaits exemples de ces systèmes inhabituels. Contrairement aux trous noirs de Schwarzschild, ils sont au zéro absolu, ce qui signifie qu'ils ne s'évaporent pas.

Revenons à l'exemple de Sen. Dans ce cas, les ondulations sur la corde se déplacent dans le même sens et, par suite, ne se cognent pas les unes aux autres. Mais ajoutons des ondulations se déplaçant dans l'autre sens. Comme vous pouvez vous y attendre, elles se cognent aux ondulations de départ et créent un peu de désordre. En fait, elles réchauffent la corde et augmentent sa température. Contrairement aux trous noirs ordinaires, ces trous noirs quasi extrémaux ne s'évaporent pas complètement : ils évacuent leur énergie excédentaire et retournent à l'état extrémal.

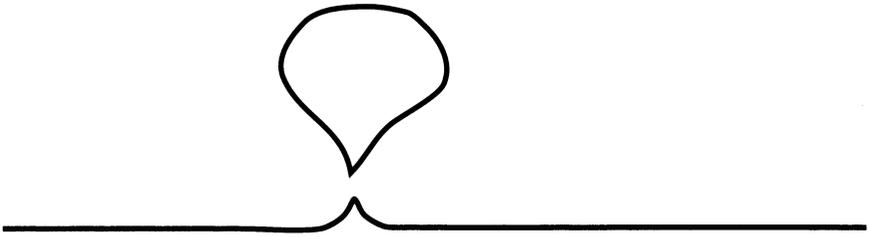
Callan et Maldacena pouvaient utiliser la théorie des cordes pour calculer la vitesse à laquelle des trous noirs quasi extrémaux s'évaporent. La façon dont la théorie des cordes explique le processus d'évaporation est fascinante. Quand deux ondulations se déplaçant en sens inverse entrent en collision,



elles forment une unique ondulation plus grande qui ressemble à quelque chose comme ceci :



Une fois cette ondulation plus grande formée, rien ne l'empêche de se détacher d'une manière qui n'est guère différente de ce dont j'avais parlé avec Feynman en 1972.



Mais Callan et Maldacena avaient fait plus que parler. Ils avaient fait des calculs très détaillés de la vitesse d'évaporation. Le fait remarquable était que leurs résultats étaient en parfait accord avec la méthode de Hawking datant de vingt ans, avec une différence importante : Maldacena et Callan n'avaient utilisé que les méthodes conventionnelles de la mécanique quantique. Ainsi que nous l'avons vu au chapitre précédent, bien qu'un élément statistique soit présent dans la mécanique quantique, elle interdit la perte de l'information. Et donc, il n'y avait aucune possibilité que l'information soit perdue dans le processus d'évaporation.

Une nouvelle fois, d'autres travaillaient sur des idées similaires. Presque indépendamment, deux duos de physiciens indiens – Sumit Das et Samir Mathur d'une part, Gautam Mandal et Spenta Wadia – de l'Institut Tata de Mumbai (Ashoke Sen venait aussi de là) firent des calculs et obtinrent des résultats semblables.

Pris ensemble, ces travaux sont des exploits prodigieux et c'est à juste titre qu'ils sont célèbres. Le fait qu'on puisse rendre compte de l'entropie d'un trou noir par l'information stockée dans les ondulations de corde allait tout à fait à l'encontre des vues de nombreux relativistes, y compris Hawking. Stephen voyait dans les trous noirs des *mangeurs d'information*, pas des conteneurs de stockage d'une information récupérable. Le succès des calculs de Strominger-Vafa montrait comment un simple résultat mathématique peut faire pencher la balance. C'était le début de la fin pour la perte de l'information.

Le côté dramatique de l'instant ne passa pas inaperçu. Nombreux furent ceux – y compris mes amis de Santa Barbara – qui désertèrent brusquement et rejoignirent le camp adverse. Si je persistais à avoir des doutes sur le fait que la guerre du trou noir allait vers sa fin, ils furent dissipés quand Joe Polchinski et Gary

Horowitz – jadis neutres dans la guerre – devinrent mes alliés¹. Pour moi, c'était là un grand tournant.

La théorie des cordes peut ou non être la bonne théorie de la nature mais elle avait montré que les arguments de Stephen n'étaient pas justes. Pour Stephen et bien d'autres au sein de la communauté de la relativité générale, c'était cuit mais, de façon incroyable, ils ne lâchaient pas prise. Ils continuaient à être aveuglés par les arguments de départ de Hawking.

1. Polchinski et Horowitz écrivirent un article qui utilisait la même méthode que celle que j'avais employée en 1993 pour calculer l'entropie de nombreuses sortes de trous noirs qui interviennent en théorie des cordes – extrémaux ou non – et, dans chaque cas, les réponses étaient en accord avec la formule de l'aire de Bekenstein-Hawking.

L'Amérique du Sud gagne la guerre

Quand il est question de brillants physiciens, la plupart des gens ne pensent pas à l'Amérique du Sud. Même les Sud-Américains sont surpris d'apprendre combien d'éminents théoriciens de la physique sont originaires d'Argentine, du Brésil et du Chili. Parmi ceux-là, Daniele Amati, Alberto Sirlin, Miguel Virasoro, Hector Rubinstein, Eduardo Fradkin et Claudio Teitelboim forment un petit nombre qui a eu un impact majeur sur le sujet qui nous occupe.

Teitelboim, qui a récemment changé son nom pour celui de Claudio Bunster (voir la note p. 146), est un personnage remarquable qui ne ressemble à aucun autre physicien qu'il m'a été donné de connaître. Sa famille avait des liens étroits avec le président socialiste chilien Salvador Allende et avec le poète-militant, lauréat du prix Nobel, Pablo Neruda. Le frère de Claudio, César Bunster, a été un des principaux responsables de la tentative d'assassinat du 7 septembre 1986 contre l'ancien dictateur fasciste, le général Augusto Pinochet.

Claudio est un homme grand et mystérieux, doté d'une puissante carrure athlétique et d'un regard ardent et pénétrant. Malgré un léger bégaiement, il a le charme et le charisme qui auraient pu faire de lui un grand dirigeant politique. D'ailleurs, il était le dirigeant d'un petit groupe de scientifiques antifascistes qui ont contribué à maintenir en activité la science au Chili durant les années sombres. Je ne doute pas un instant que sa vie était en danger à cette époque.

Claudio a d'énormes aptitudes et une pointe de véritable folie. Bien qu'ennemi du régime militaire du Chili, il aime tout le

décorum de la vie militaire. Quand, avant de retourner au Chili, il vivait au Texas, il fréquentait les expositions de vente d'armes et, aujourd'hui encore, il porte souvent des treillis. La première fois que je lui ai rendu visite au Chili, il m'a flanqué la frousse en jouant au soldat.

C'était en 1989 ; la dictature de Pinochet était toujours au pouvoir. Quand ma femme et moi-même, ainsi que notre ami Willy Fischler, descendîmes de l'avion à Santiago, nous fûmes conduits dans une longue file d'attente pour l'inspection des passeports par des hommes en uniforme lourdement armés. Les employés au contrôle des passeports étaient des militaires, tous armés, quelques-uns avec de grandes armes automatiques. Passer le contrôle n'était pas facile : la longue file n'avancait guère et nous étions épuisés.

Brusquement, je vis une grande silhouette portant lunettes et tenue militaire (ou ce qui pouvait passer pour tel) forcer le passage et nous foncer droit dessus. C'était Claudio en train de donner des ordres aux soldats comme s'il était un général.

Quand il nous a rejoints, il m'a saisi par le poignet et nous a escortés avec autorité au-delà des gardes, les écartant d'un geste avec une extraordinaire autorité. Il empoigna nos bagages et nous conduisit vite à l'extérieur de l'aéroport vers sa jeep kaki en stationnement interdit. Nous avons ensuite foncé, parfois sur deux roues, en dehors de l'aéroport puis dans Santiago. Chaque fois que nous croisions un groupe de soldats, Claudio les saluait. Je lui soufflai : « Qu'est-ce que c'est que cette p... d'histoire ? Tu vas nous faire tuer ! » Mais personne ne nous a arrêtés...

La dernière fois que je suis allé au Chili¹, bien après que le régime de Pinochet eut été remplacé par un gouvernement démocratique, Claudio avait de véritables contacts avec l'armée, particulièrement l'aviation. C'était à l'occasion d'une conférence sur les trous noirs qu'il avait organisée dans son petit institut. Il avait usé de son influence dans l'aviation pour faire visiter à quelques-uns d'entre nous, dont Hawking et moi-même, la base chilienne de l'Antarctique. Nous nous sommes beaucoup amusés mais la chose la plus remarquable a été la façon dont des généraux de l'armée de l'air, y compris le chef d'état-major, nous ont reçus : c'est un général qui nous a servi

1. Alors que l'édition américaine de ce livre en était à son dernier stade, je me suis à nouveau rendu au Chili en 2008, cette fois pour célébrer le soixantième anniversaire de Claudio Bunster. La photographie de Stephen et de moi-même reproduite à la fin de cet ouvrage a été prise lors de cette fête.

le thé, tandis qu'un autre se chargeait des hors-d'œuvre. Il était évident que Claudio avait une influence considérable au Chili !

Mais c'est en 1989, à l'occasion d'une excursion en bus dans la cordillère des Andes, que Claudio me parla pour la première fois de certains *trous noirs anti de Sitter*. On les appelle aujourd'hui *trous noirs BTZ*, pour Bañados, Teitelboim et Zanelli. Max Bañados et Jorge Zanelli faisaient partie du premier cercle de Claudio quand, tous les trois, ils firent une découverte qui allait avoir un effet durable sur la guerre du trou noir.

Anges et démons

Les spécialistes des trous noirs ont un fantasme permanent : confiner un trou noir dans une boîte pour le garder à l'abri comme un précieux joyau. À l'abri de quoi ? De l'évaporation. Enfermer dans une boîte, c'est comme mettre un couvercle sur une casserole d'eau : au lieu de s'évaporer dans l'espace, les particules rebondiront sur les parois de la boîte (ou le couvercle de la casserole) et tomberont droit dans le trou noir (ou la casserole).

Bien sûr, personne ne mettra jamais un trou noir dans une boîte mais l'expérience de pensée est intéressante. Un trou noir stable, immuable serait beaucoup plus simple que celui qui s'évapore. Mais il y a un problème : aucune boîte réelle ne peut éternellement entourer un trou noir. Comme tout, les boîtes véritables ont des soubresauts aléatoires et, tôt ou tard, un accident se produira : la boîte entrera en contact avec le trou noir et... oups ! Elle sera engloutie aussitôt !

C'est là qu'interviennent les espaces anti de Sitter (AdS). Tout d'abord, malgré son nom, un espace anti de Sitter est vraiment un continuum d'espace-temps qui contient une dimension temporelle. Willem de Sitter était un physicien, mathématicien et astronome hollandais qui a découvert la solution quadridimensionnelle des équations d'Einstein qui porte son nom. Mathématiquement, l'espace de De Sitter est un univers en expansion exponentielle qui grandit de façon très semblable au nôtre¹. Pendant longtemps, on a vu l'espace de

1. Ces dernières années, astronomes et cosmologistes ont découvert que notre univers est en expansion accélérée, sa taille doublant environ tous les dix milliards d'années. On pense que cette expansion exponentielle est due à une constante cosmologique, ou « énergie noire » comme l'appellent les gazettes.

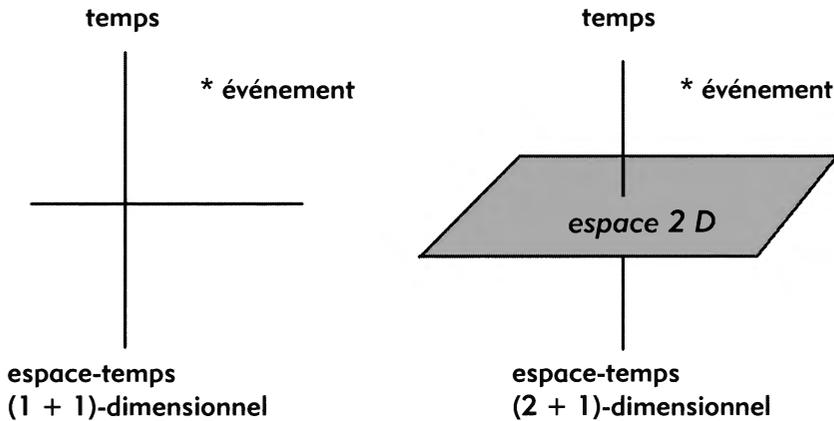
De Sitter comme n'étant rien de plus qu'une curiosité. Mais, ces dernières années, il a acquis une importance primordiale pour les cosmologistes. Il s'agit d'un continuum d'espace-temps à courbure positive, ce qui signifie que la somme des angles d'un triangle est supérieure à 180 degrés. Mais tout cela est en dehors de la question. Ici, ce qui nous intéresse est un espace *anti de Sitter*, pas un espace de De Sitter.

L'espace anti de Sitter n'a pas été découvert par un jumeau de De Sitter fait d'antimatière. « Anti » indique que la courbure de l'espace est négative, ce qui signifie que la somme des angles d'un triangle est inférieure à 180 degrés. La chose la plus intéressante à propos de l'AdS est qu'il possède beaucoup des propriétés de l'intérieur d'une boîte sphérique, mais une boîte qui ne peut pas être engloutie par un trou noir. Cela vient de ce que les parois de l'AdS exercent une force puissante – une répulsion irrésistible – sur tout ce qui les approche, et donc l'horizon du trou noir. La répulsion est si forte qu'il n'y a aucune possibilité de contact entre les parois et le trou noir.

Globalement, notre espace-temps ordinaire a quatre dimensions : les trois dimensions spatiales et une pour le temps. Il arrive que les physiciens disent qu'il est quadridimensionnel, mais cela occulte la différence évidente entre espace et temps. Une description plus précise est de parler de l'espace-temps comme étant à $(3 + 1)$ dimensions.

Flatland et Lineland sont aussi des continuums. Flatland est un monde où il n'y a que deux dimensions spatiales mais dont les habitants ressentent aussi le temps. Pour qualifier correctement leur monde, ils devraient dire qu'il est $(2 + 1)$ -dimensionnel. Les Linelanders, qui ne peuvent se déplacer que le long d'un axe mais peuvent aussi évoluer en fonction du temps, vivent dans un espace-temps $(1 + 1)$ -dimensionnel. Ce qu'il y a de merveilleux avec les $(2 + 1)$ et $(1 + 1)$ dimensions, c'est qu'on peut facilement les représenter pour aider nos intuitions.

Bien entendu, il n'y a rien qui empêche un spécialiste de physique mathématique d'inventer des mondes avec n'importe quel nombre de dimensions spatiales, malgré l'inaptitude du cerveau à les visualiser. On pourrait se demander s'il est aussi possible de changer le nombre de dimensions du temps. Dans un sens mathématique complètement abstrait, la réponse est oui mais cela ne paraît pas avoir beaucoup de sens du point de vue d'un physicien. Une seule dimension temporelle paraît être le bon nombre.



L'espace anti de Sitter se présente aussi dans de nombreuses dimensions. Il peut posséder n'importe quel nombre de directions spatiales mais une seule de temps. L'espace AdS sur lequel Bañados, Teitelboim et Zanelli travaillaient était $(2 + 1)$ -dimensionnel, ce qui le rendait plus simple à expliquer avec des dessins.

De nombreuses dimensions pour faire de la physique

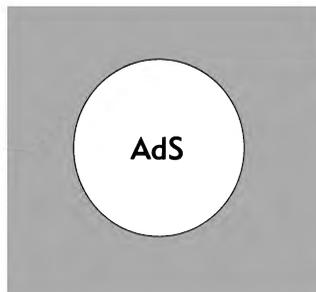
L'espace à trois dimensions (*pas* l'espace-temps) est une des choses qui paraissent ancrées dans notre système cognitif. Personne ne peut visualiser un espace à quatre dimensions sans le truchement de mathématiques abstraites. Peut-être pensez-vous qu'il est plus simple de se représenter un espace uni- ou bi-dimensionnel et, dans un certain sens, c'est vrai. Mais si vous y réfléchissez un moment, vous vous rendez compte que vous le faites toujours en les plongeant dans l'espace à trois dimensions. Cela est certainement dû à la façon dont nos cerveaux ont évolué et n'a rien à voir avec des propriétés mathématiques quelconques liées à trois dimensions¹.

1. Le monde physique aurait-il pu être uni- ou bi-dimensionnel (je parle d'espace, pas d'espace-temps) ? Je ne peux pas en être sûr – nous ne connaissons pas tous les principes qui pourraient conduire à cela – mais, d'un point de vue mathématique, la mécanique quantique comme la relativité restreinte sont aussi cohérentes en une ou deux dimensions qu'en trois. Je ne veux pas dire qu'une vie intelligente pourrait exister dans ces univers alternatifs mais seulement qu'un certain type de physique y paraît possible.

La théorie quantique des champs – la théorie des particules élémentaires – a autant de sens dans un monde avec moins de dimensions que dans celui à trois dimensions. Pour autant que nous le sachions, il est parfaitement possible qu'il existe des particules élémentaires dans l'espace bidimensionnel (Flatland) ou unidimensionnel (Lineland). En fait, les équations de la théorie quantique des champs sont plus simples quand le nombre de dimensions est plus petit et beaucoup de ce que nous savons dans ce domaine a été découvert tout d'abord par l'étude de tels modèles d'univers. Il n'y avait donc rien d'inhabituel dans le fait que Bañados, Teitelboim et Zanelli étudient un univers avec seulement deux dimensions spatiales.

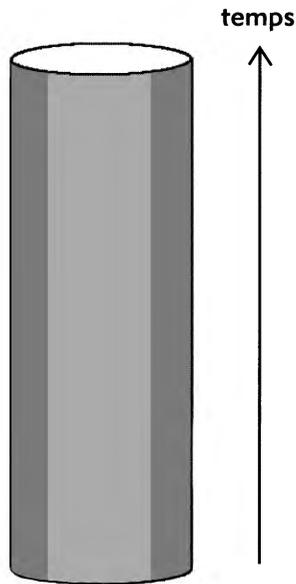
Espace anti de Sitter

La meilleure façon d'expliquer ce qu'est un espace AdS est la façon dont l'a fait Claudio dans l'excursion en bus au Chili : avec des dessins. Oublions le temps et commençons par l'espace ordinaire à l'intérieur d'une boîte ronde creuse : en deux dimensions, c'est encore plus simple, c'est l'intérieur d'un cercle.

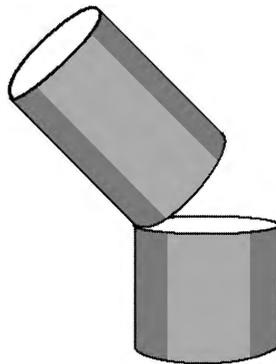


Ajoutons-y maintenant le temps. En plaçant le temps le long de l'axe vertical, le continuum d'espace-temps à l'intérieur de la boîte ressemble à l'intérieur d'un cylindre. Dans la figure qui suit, l'AdS est l'intérieur non hachuré du cylindre.

Imaginez que nous coupons en tranches l'AdS (rappelez-vous : il a une dimension spatiale) de la même façon que nous l'avions fait avec un trou noir pour réaliser un diagramme de plongement.

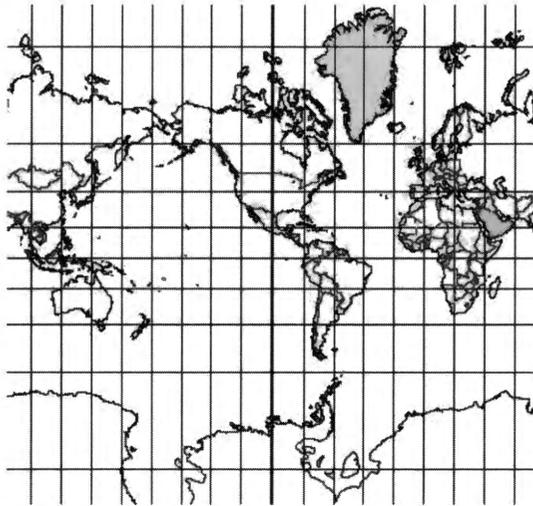


Ce découpage fait apparaître une coupe transversale spatiale dont on peut vraiment dire qu'elle est un espace.



Regardons de plus près la tranche bidimensionnelle. Comme on peut s'y attendre, elle aussi est courbe, d'une certaine façon comme la surface de la Terre. Cela signifie que, pour la dessiner sur un plan (une feuille de papier), il faut en étirer et tordre la surface. Il est impossible de dessiner une carte de la Terre sur une feuille de papier plane sans y faire des déformations importantes. Les régions qui se trouvent sur les bords nord et sud d'une carte de Mercator

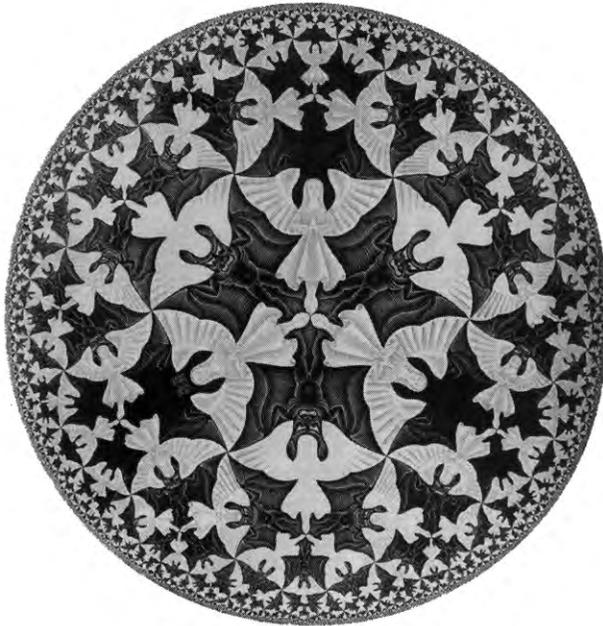
paraissent bien trop grosses par rapport à celles qui se trouvent près de l'équateur. Le Groenland semble être aussi gros que l'Afrique, même si l'aire de cette dernière est en réalité environ quinze fois plus grande.



L'espace (l'espace-temps aussi) dans un AdS est courbe mais, contrairement à la surface de la Terre, la courbure est négative. La déformer en un plan a un effet « anti-Mercator » : ce qui est près du bord paraît trop petit. La fameuse représentation d'Escher *Limite circulaire IV* reproduite ci-après est une « carte » d'un espace à courbure négative qui montre exactement à quoi ressemblent les tranches bidimensionnelles d'un AdS.

Je trouve à *Limite circulaire IV* des vertus hypnotiques, et c'est un euphémisme. (Cela me rappelle *Souris, père et fils* et la quête sans fin des personnages pour voir le dernier chien visible – reportez-vous au chapitre 20.) Anges et démons à l'infini, s'estompant dans un infini bord fractal. Escher a-t-il pactisé avec le démon, l'autorisant à dessiner un nombre infini d'anges ? Ou bien, en regardant suffisamment attentivement, verrai-je le dernier ange visible ?

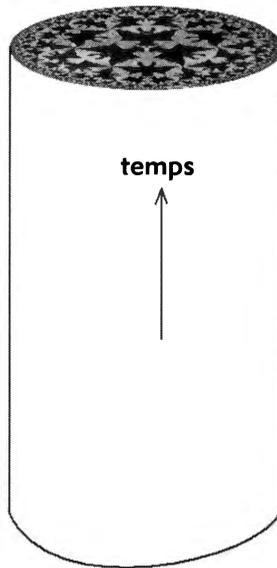
Arrêtez-vous un moment pour vous reprogrammer afin de pouvoir voir anges et démons comme ayant la même taille. Ce n'est pas une gymnastique mentale facile ; cela vous aidera si



vous vous rappelez que le Groenland a presque exactement la même taille que la péninsule arabique en dépit du fait qu'il a l'air d'être huit fois plus gros sur une carte de Mercator. Apparemment, Escher était exceptionnellement bien programmé pour ce genre d'exercice mental mais, avec un peu de pratique, vous y arriverez aussi.

Ajoutons maintenant le temps et mettons tout cela ensemble dans une représentation d'un espace anti de Sitter (voir ci-contre). Comme d'habitude, nous placerons le temps sur l'axe vertical. Chaque tranche horizontale représente l'espace ordinaire à un instant précis. Pensez à l'AdS comme à une infinité de tranches fines d'espace – un saucisson infini finement coupé – qui, une fois empilées, forment un continuum d'espace-temps.

L'espace est bizarrement emballé dans un AdS, mais pas plus que ne l'est le temps. Rappelez-vous que nous avons vu, au chapitre 3, que, dans la théorie de la relativité générale, les horloges placées à des endroits différents ont souvent des rythmes différents. Par exemple, le ralentissement des horloges près de l'horizon des trous noirs permet d'utiliser ces derniers comme machine à voyager dans le temps. Dans un AdS, le comportement



des horloges est aussi bizarre. Imaginez que chaque démon d'Escher ait sa propre montre. Si les démons qui sont près du centre regardent leurs voisins se trouvant un peu plus loin, ils remarqueront quelque chose de curieux : les pendules les plus distantes avancent deux fois plus vite que les leurs. En admettant que les démons ont un métabolisme, les fonctions métaboliques des voisins extérieurs iront aussi plus vite. En fait, de quelque façon qu'on le mesure, le temps semblera accéléré et, quand on regarde plus loin, les horloges paraissent aller encore plus vite. Chaque couche successive ira plus vite que la précédente jusqu'à ce que, en s'éloignant vers le bord, les montres aillent si vite que les démons se trouvant près du centre ne voient plus que le tournoiement d'une tache.

La courbure de l'espace-temps d'un AdS crée un champ gravitationnel qui pousse les objets vers le centre, *même si rien ne s'y trouve*. Une manifestation de ce champ gravitationnel fantomatique est que, si une masse était déplacée vers le bord, elle serait tirée en arrière, presque comme si elle était sur un ressort. Abandonnée à elle-même, la masse irait d'avant en arrière et d'arrière en avant indéfiniment. Il y a un autre effet qui, en réalité, n'est que le pendant du précédent : tirer vers le centre, c'est la même chose que repousser depuis le bord. Cette poussée est la répulsion irrésistible

qui empêche tout, y compris les trous noirs, d'entrer en contact avec le bord.

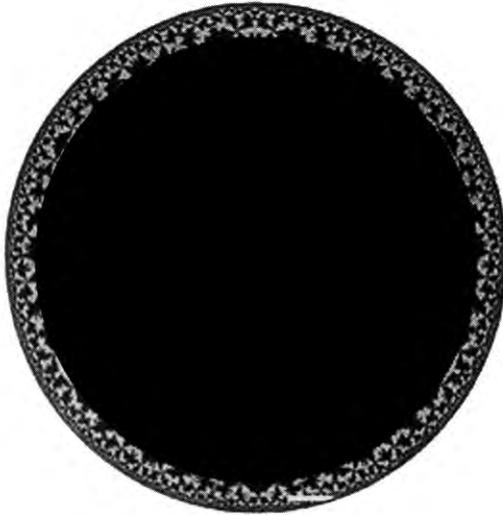
Les boîtes sont faites pour qu'on y mette des choses : mettons-y donc quelques particules. Où qu'on les mette, elles seront tirées vers le centre. Une particule isolée oscillera éternellement autour du centre mais, si elles sont deux ou plus, elles peuvent entrer en collision. La gravité – pas celle fantomatique de l'AdS mais l'attraction gravitationnelle ordinaire entre particules – peut faire qu'elles s'unissent pour former un agrégat. Ajouter des particules fera augmenter température et pression au centre de celui-ci, qui peut finir par s'allumer, donnant naissance à une étoile. L'ajout d'encore plus de masse finira par un effondrement cataclysmique : un trou noir se formera – un trou noir enfermé dans la boîte.

Bañados, Teitelboim et Zanelli n'étaient pas les premiers à étudier les trous noirs dans des AdS : cet honneur revient à Don Page et Stephen Hawking. Mais BTZ découvrirent l'exemple le plus simple, facile à visualiser parce que l'espace n'a que deux dimensions. Voici un instantané imaginaire d'un trou noir BTZ. Le bord de la zone noire est l'horizon.



En dehors d'une exception, les trous noirs anti de Sitter ont tous les attributs de leurs cousins ordinaires. Comme toujours, une singularité très désagréable se cache au-delà de l'horizon. Augmenter la masse agrandira la taille du trou noir, repoussant l'horizon plus près du bord.

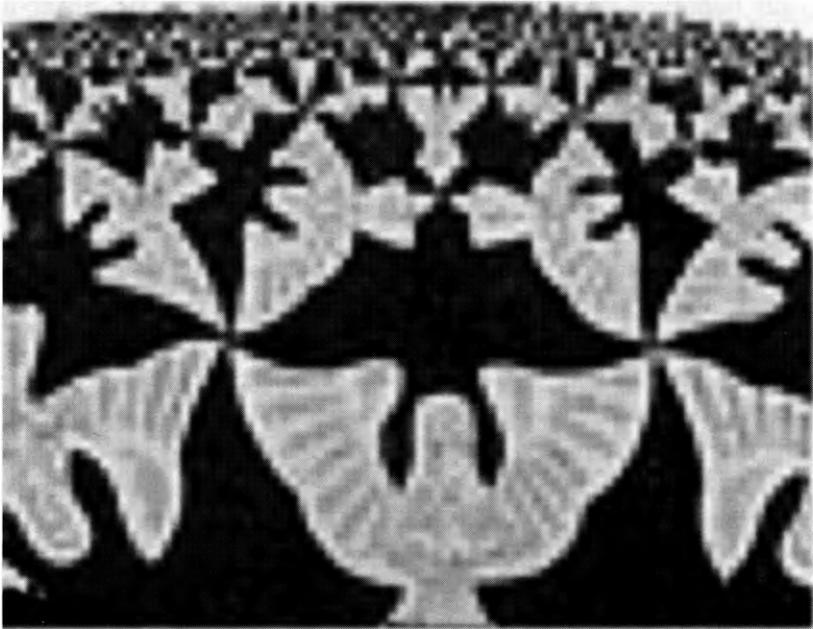
**Augmenter la masse :
le trou noir grandit**



Mais, contrairement aux trous noirs ordinaires, la variante AdS ne s'évapore pas. L'horizon est une surface infiniment chaude, qui émet continuellement des photons. Mais ces photons n'ont pas où aller. Au lieu de s'évaporer dans le vide, ils tombent dans le trou noir.

Pour en savoir un peu plus sur les AdS

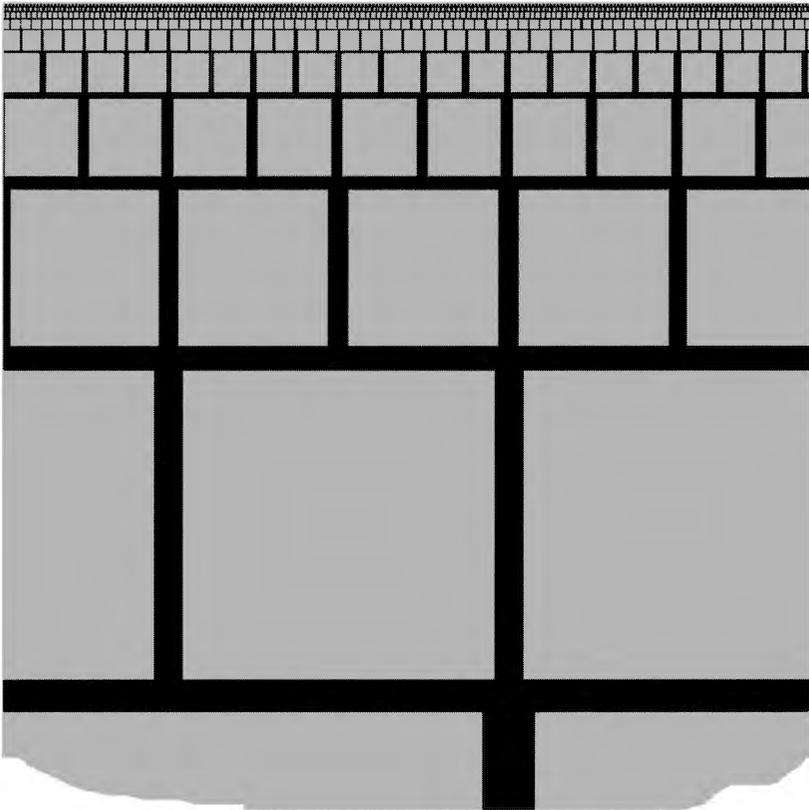
Imaginez que nous faisons un gros plan sur un point du bord de *Limite circulaire IV*, puis l'agrandissons jusqu'à ce que le bord paraisse très droit :



Nous pouvons recommencer encore et encore, sans jamais manquer d'anges ni de démons, jusqu'à ce que le bord paraisse parfaitement droit et infini. Je ne suis pas Escher, aussi ne vais-je pas essayer de reproduire ses créatures élégantes... Mais, si je simplifie au point de remplacer les démons par des carrés, l'image devient celle d'un treillis de carrés de plus en plus petits à mesure qu'on s'approche du bord. Représentez-vous l'AdS comme un mur de briques infini : quand vous abaissez votre regard le long du mur, la taille des briques double à chaque couche nouvelle (ci-contre).

Bien entendu, il n'y aurait pas de véritables lignes dans un espace anti de Sitter, pas plus qu'il n'y a de lignes indiquant longitudes et latitudes à la surface de la Terre. Elles ne sont là que pour guider votre œil et indiquer comment les tailles sont déformées à cause de la courbure de l'espace.

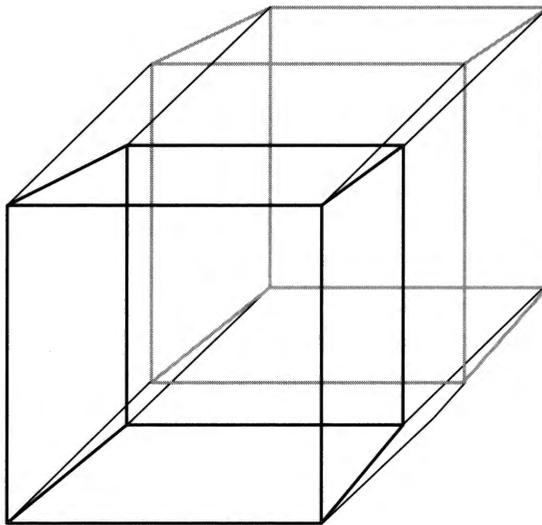
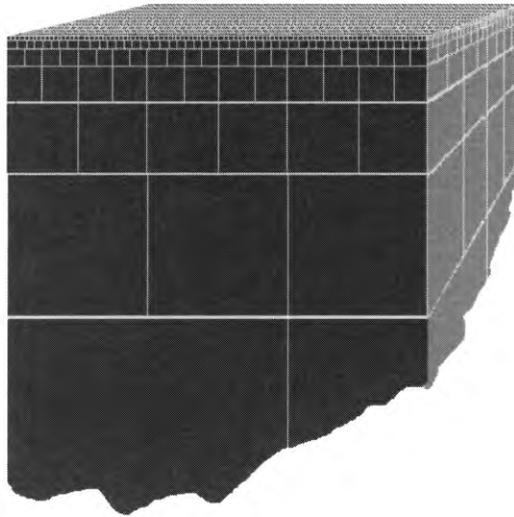
Le dessin d'Escher et ma version grossière représentent des espaces bidimensionnels mais l'espace réel est tridimensionnel. Il n'est pas difficile d'imaginer à quoi ressemblerait l'espace si l'on y ajoutait une dimension (pas celle du temps). Tout ce qu'il nous faut faire est remplacer les carrés par des cubes solides en trois dimensions. Dans le



dessin en haut de la page suivante, je vous montre une partie finie du « mur de briques » en 3D ; mais gardez à l'esprit qu'il se poursuit indéfiniment dans les directions horizontales et dans la direction verticale.

Ajouter le temps à la représentation est la même chose que précédemment : chaque carré, ou cube, est équipé de sa propre horloge. Le rythme de chacune d'elles dépend de la couche sur laquelle elle se trouve. Chaque fois que nous passons sur une couche plus près du bord, les horloges vont deux fois plus vite. Inversement, quand nous descendons le mur, elles ralentissent.

Sous un angle mathématique, il n'y a aucune raison d'en rester à trois dimensions spatiales. En empilant des cubes quadridimensionnels de diverses tailles, il est possible de construire un espace anti de Sitter $(4 + 1)$ -dimensionnel ou de n'importe quel nombre de dimensions. Seulement dessiner un seul cube 4D est quelque chose de compliqué. Voici une tentative (en bas de la page suivante).



Essayer de les empiler pour représenter une version 4D de l'AdS donnerait un fouillis déroutant.

L'univers dans une boîte

Empêcher les trous noirs de s'évaporer est déjà une bonne raison de faire de la physique à l'intérieur d'une boîte. Mais l'idée

de l'univers dans une boîte est de loin plus intéressante que cela. Le but véritable est de comprendre le principe holographique et de le rendre mathématiquement plus précis. Voici ce que j'en disais au chapitre 18 : « Le monde tridimensionnel de la réalité ordinaire – l'univers rempli de galaxies, d'étoiles, de planètes, de maisons, de pierres et de personnes – est un hologramme, une représentation de la réalité codée sur une surface bidimensionnelle éloignée. Cette nouvelle loi de la physique, connue sous le nom de principe holographique, affirme que ce qui est contenu dans toute portion de l'espace peut être décrit par des bits d'information limités au bord de cette dernière. »

L'imprécision dans la formulation du principe holographique vient en partie de ce que des objets peuvent traverser le bord : il ne s'agit, après tout, que d'une surface mathématique imaginaire sans réelle matérialité. La possibilité que des objets puissent entrer ou sortir de la portion d'espace rend confuse la signification de : « Ce qui est contenu dans toute portion de l'espace peut être décrit par des bits d'information limités au bord de cette dernière. » Mais un univers dans une boîte dont les parois sont parfaitement impénétrables ne connaîtrait pas ce problème. La nouvelle formulation serait :

Ce qui est contenu dans toute boîte dont les parois sont impénétrables peut être décrit par des bits d'information codés en pixels sur les parois.

Pendant notre excursion en bus en 1989, je n'avais pas compris pourquoi les espaces anti de Sitter excitaient tant Claudio Teitelboim. Des trous noirs dans une boîte ? Et alors ? Il me fallut encore huit ans pour saisir – huit ans et un autre physicien sud-américain, argentin cette fois.

La stupéfiante découverte de Maldacena

Juan Maldacena est différent en tout de Claudio Teitelboim. Il n'est pas aussi grand et est bien plus posé. Il m'est impossible de l'imaginer vêtu d'un faux uniforme militaire et fonçant à toute vitesse à travers les dangers de Santiago. Mais, comme physicien, il ne manque pas de courage. En 1997, il se jeta à l'eau et se lança dans une affirmation d'une audace extraordinaire, une affirmation qui paraissait presque aussi folle que mon équipée sauvage avec Claudio. En fait, Maldacena affirma que deux mondes mathématiques qui paraissaient totalement dissemblables

étaient en fait exactement les mêmes. Un de ces mondes avait quatre dimensions spatiales et une temporelle ($4 + 1$), tandis que l'autre est ($3 + 1$)-dimensionnel, plus proche de notre monde usuel. Je vais prendre quelques libertés en simplifiant l'histoire pour la rendre plus facile à visualiser en réduisant dans chaque cas le nombre de dimensions d'une unité. C'est ainsi que je dirai qu'une certaine version fictive de Flatland – un univers ($2 + 1$)-dimensionnel – est d'une façon ou d'une autre, équivalent à un univers anti de Sitter de ($3 + 1$) dimensions.

Comment une telle chose est-elle possible ? Ce qui s'impose de prime abord quand il est question d'espace est le nombre de ses dimensions. Une inaptitude à reconnaître la dimensionnalité d'un espace constituerait un trouble perceptuel grave. Il n'est vraiment pas possible de confondre deux et trois dimensions, du moins quand on est sain d'esprit et à jeun. En tout cas, on pourrait le croire.

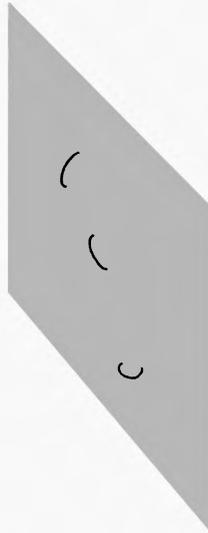
Le parcours qui a conduit à la découverte de Maldacena était un chemin alambiqué, tortueux qui serpentait en passant par les trous noirs extrémaux, les D-branes et quelque chose appelé théorie de la matrice¹ pour terminer enfin par une extraordinaire confirmation du principe holographique.

Cela commençait avec les D-branes de Polchinski. Rappelez-vous qu'une D-brane est un objet matériel qui, selon le nombre de ses dimensions, peut être un point, une ligne, une feuille ou un solide remplissant l'espace. La principale propriété qui distingue une D-brane de n'importe quoi d'autre est que les cordes fondamentales peuvent y avoir une extrémité. Pour être précis, prenons des D2-branes². Pensez à une surface plate bidimensionnelle flottant dans l'espace à trois dimensions comme un tapis volant. Des cordes ouvertes peuvent s'attacher à la D-brane par leurs deux extrémités. Elles peuvent glisser le long de la D-brane mais pas sauter librement dans la troisième dimension. Les morceaux de corde patinent sans frottement sur une piste métaphorique de glace, incapables de lever leurs pieds. Vu d'une certaine distance, chaque morceau de corde

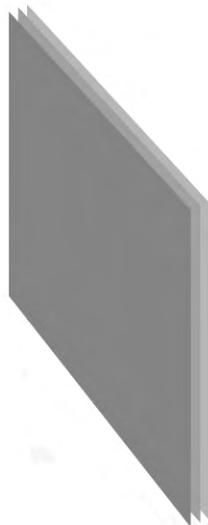
1. La théorie de la matrice dans ce contexte n'a rien à voir avec la théorie des matrices de diffusion (S-matrix). Il s'agissait d'une découverte antérieure, proche de celle de Maldacena, qui mettait aussi en jeu une mystérieuse augmentation du nombre de dimensions. Cela a été le premier exemple d'une correspondance mathématique confirmant le principe holographique. La théorie de la matrice a été découverte en 1996 par Tom Banks, Willy Fischler, Steve Shenker et moi-même.

2. Dans son travail original, Maldacena s'est concentré sur un exemple mettant en jeu un espace quadridimensionnel. Il faudrait l'appeler un AdS ($4 + 1$)-dimensionnel. La raison qui fait travailler avec un espace à quatre dimensions plutôt que les trois dimensions habituelles est technique et n'a pas d'importance pour la suite de ce chapitre. Par contre, elle interviendra en partie dans l'épilogue.

ressemble à une particule se déplaçant dans un univers à deux dimensions. S'il y a plus d'une corde, elles peuvent entrer en collision, se disperser voire fusionner en des objets plus complexes.



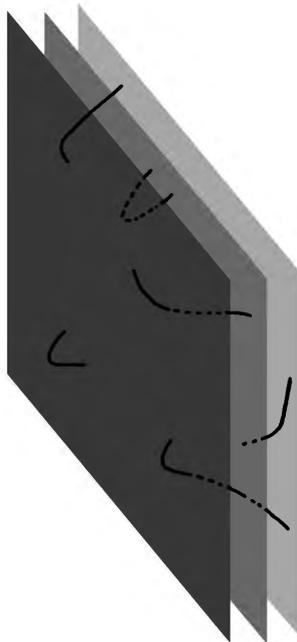
Les D-branes peuvent exister individuellement mais elles sont collantes. Si elles sont mises en contact avec douceur, elles se lient pour former une brane composée faite de plusieurs couches, comme dans l'illustration suivante.



J'ai montré les D-branes comme étant légèrement séparées les unes des autres mais, quand elles s'unissent, les trous disparaissent. Un groupe de D-branes unies est appelé *pile de D-branes*.

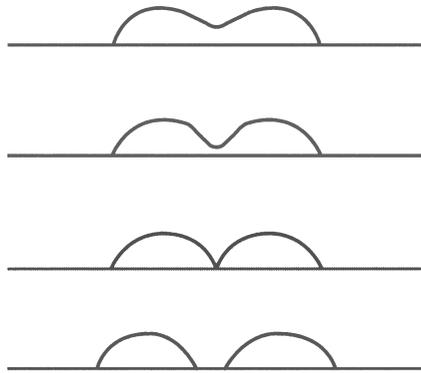
Les cordes ouvertes se déplaçant sur une pile de D-branes ont des propriétés plus riches et davantage de variété que les cordes qui se déplacent sur une unique D-brane. Les deux extrémités d'une corde peuvent être attachées à différents éléments de la pile, comme si un patin se déplaçait sur un plan légèrement décalé de celui de l'autre. Pour suivre les différentes branes, nous pouvons leur donner des noms. Par exemple, dans la pile ci-dessus, nous pourrions les appeler rouge, verte et bleue.

Les cordes qui patinent sur la pile de D-branes doivent toujours avoir leurs extrémités attachées à une D-brane mais il y a désormais plusieurs possibilités. Par exemple, une corde peut avoir ses deux extrémités attachées à la brane rouge. Cela ferait d'elle une corde rouge-rouge. De même, on pourrait avoir des cordes bleue-bleue ou verte-verte. Mais il est aussi possible que les deux extrémités d'une corde soient attachées à différentes branes. C'est ainsi qu'on pourrait avoir des cordes rouge-verte, rouge-bleue, et ainsi de suite. En fait, il y a neuf possibilités distinctes pour les cordes de se déplacer sur cette pile de D-branes.



Il peut se produire des choses intéressantes si différentes cordes sont attachées aux branes.

Les cordes sur des piles de D2-branes ressemblent beaucoup à des particules ordinaires bien que se trouvant dans un monde ne comportant que deux dimensions spatiales. Elles interagissent les unes avec les autres, se dispersent quand elles entrent en collision et exercent des forces sur les cordes proches. Une corde peut aussi se casser en deux cordes. Voici une série décrivant comment une corde sur une seule brane peut se scinder en deux. La série se déroule dans le temps du haut vers le bas.

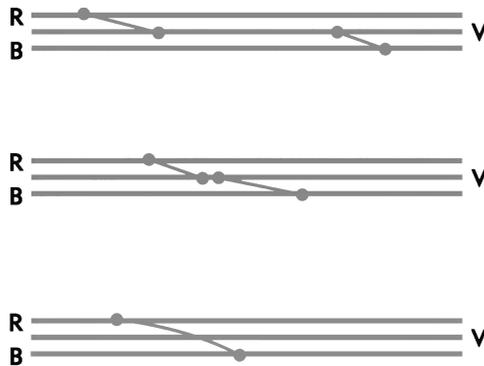


Un point de la corde initiale entre en contact avec la brane, ce qui permet à la corde de se scinder en deux mais toutes les extrémités doivent toujours rester attachées à la brane. Cette série peut aussi être lue du bas vers le haut et montrer alors comment une paire de cordes fusionnent pour former une seule corde.

Voici une série mettant en jeu des cordes sur une pile de trois D-branes. Elle décrit une corde rouge-verte entrant en collision avec une autre verte-bleue. Les deux fusionnent pour former une seule corde rouge-bleue.

Une corde rouge-rouge ne pourrait pas fusionner avec une verte-verte du fait que leurs extrémités ne peuvent pas se toucher.

N'avez-vous pas l'impression d'avoir déjà vu tout cela ? C'est le cas, si toutefois vous avez lu le chapitre 19 : les règles qui régissent le comportement des cordes attachées à une pile de D-branes sont exactement les mêmes que celles qui régissent celui des gluons en chromodynamique quantique (QCD). Au chapitre 19, j'avais expliqué qu'un gluon est comme une petite barre aimantée avec deux extrémités, chacune étiquetée par une couleur. Les simi-



litudes ne s'arrêtent pas là. La figure ci-dessus qui montre deux cordes se combinant pour en former une seule est tout à fait comme un diagramme vertex de gluon en QCD.

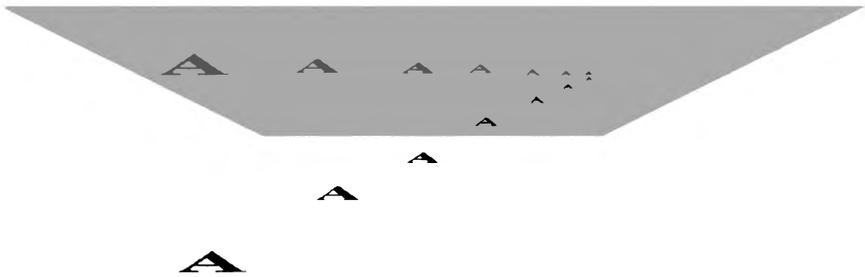
Ce parallèle entre la « physique sur une D-brane » et le monde usuel des particules élémentaires est un fait fascinant qui, ainsi que nous le verrons au chapitre suivant, s'est révélé être extrêmement utile. Quand les physiciens découvrent deux façons de décrire le même système, ils disent que les deux descriptions sont « duales l'une de l'autre ». Un exemple en est la description duale de la lumière comme ondes ou particules. La physique est pleine de *duautés* et il n'y avait rien de particulièrement surprenant ou nouveau dans le fait que Maldacena avait découvert deux descriptions duales de cordes sur une D-brane. Ce qui était nouveau, sans précédent¹, était que les deux descriptions brossaient des mondes ayant *des nombres différents de dimensions spatiales*.

J'ai déjà fait allusion à une description : la version Flatland (2 + 1)-dimensionnelle de QCD. Elle décrit des protons, des mésons et des glueballs plats mais, comme la véritable QCD, elle ne contient aucune trace de la gravité. La moitié duale – l'autre façon de décrire exactement la même chose – dépeint un univers à *trois dimensions*, mais pas n'importe lequel : un espace anti de Sitter. Maldacena a expliqué que la QCD Flatland est duale d'un univers anti de Sitter (3 + 1)-dimensionnel. Qui plus est, dans cet univers, matière et énergie exercent des forces gravitationnelles exactement comme dans le monde réel. Autrement dit, un univers

1. Presque sans précédent, mais pas tout à fait. La théorie de la matrice était un exemple antérieur.

en $(2 + 1)$ dimensions qui englobe la QCD mais pas la gravité est équivalent à un univers en $(3 + 1)$ dimensions *avec gravité*.

Comment cela se peut-il ? Pourquoi un monde en deux dimensions serait-il exactement le même qu'un avec trois dimensions ? D'où vient cette dimension supplémentaire ? La clef est la distorsion d'un espace anti de Sitter qui fait paraître les objets situés près du bord plus petits que les mêmes objets qui se trouvent dans les profondeurs intérieures de l'espace. La distorsion affecte les démons imaginaires mais aussi les objets réels quand ils se déplacent à travers l'espace. Par exemple, si l'on projette une lettre *A* d'un mètre sur le bord en créant une ombre, l'image rétrécirait ou grandirait selon que l'objet s'approche ou s'éloigne du bord.



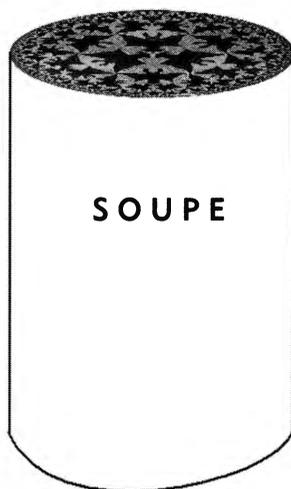
Vu de l'intérieur en trois dimensions, il s'agit d'une illusion qui n'a pas plus de réalité que la grande taille du Groenland sur une carte de Mercator. Mais, dans la description duale – la théorie Flatland –, il n'y a pas de notion de distance dans la troisième dimension perpendiculaire. C'est la notion de taille qui prend sa place. C'est une relation mathématique très surprenante : grandir ou rétrécir dans la première moitié de la dualité est exactement la même chose que se mouvoir en avant ou en arrière le long de la troisième direction dans l'autre moitié de la dualité.

Une nouvelle fois, voilà qui doit avoir une connotation familière, cette fois venant du chapitre 18 où nous avons découvert que l'univers est une sorte d'hologramme. Les deux descriptions duales de Maldacena étaient le principe holographique en action. Tout ce qui se trouve à l'intérieur d'un espace anti de Sitter « est un hologramme, une représentation de la réalité codée sur une surface bidimensionnelle éloignée ». Un univers tridimensionnel avec gra-

tivité est équivalent à un hologramme quantique bidimensionnel sur le bord de l'espace.

Je ne sais pas si Maldacena fit le rapport entre sa découverte et le principe holographique mais Ed Witten le fit bientôt. Seulement deux mois après l'article de Maldacena, Witten mit son propre article en ligne sur Internet avec pour titre : « Espace anti de Sitter et holographie ».

Soupe



De tout ce qu'il y avait dans l'article de Witten, une partie sur les trous noirs a particulièrement attiré mon attention. Un espace anti de Sitter – la version originale, pas la version mur de briques aplati – est comme une boîte de soupe. Les tranches horizontales représentent l'espace ; l'axe vertical de la boîte est celui du temps. L'étiquette extérieure représente le bord et l'intérieur est le continuum d'espace-temps lui-même.

Un AdS à l'état pur est comme une boîte vide, mais cela peut être plus intéressant de le remplir de « soupe » – c'est-à-dire de matière et d'énergie. Witten expliquait que, si l'on introduisait dans la boîte matière et énergie en quantités suffisantes, on pourrait créer un trou noir. Cela soulevait une question : d'après Maldacena, il doit y avoir une deuxième description – une description duale – qui ne se réfère pas à l'intérieur de la boîte. L'autre description devrait se faire en termes de théorie quantique des champs

bidimensionnelle de particules semblables à des gluons se déplaçant sur l'étiquette. Le trou noir dans la soupe doit avoir son équivalent sur l'hologramme du bord mais quel est-il ? Dans la théorie du bord, Witten expliquait que le trou noir de la soupe était l'équivalent d'un fluide chaud de particules élémentaires – fondamentalement, de simples gluons.

Dès que j'ai lu l'article de Witten, j'ai su que la guerre du trou noir était terminée. La théorie quantique des champs est un cas particulier de la mécanique quantique dans laquelle l'information ne peut jamais être perdue. Quoi que Maldacena et Witten aient dit par ailleurs, ils avaient prouvé sans l'ombre d'un doute que l'information ne peut jamais être perdue au-delà de l'horizon d'un trou noir. Les théoriciens des cordes pouvaient comprendre cela immédiatement ; cela prendrait un peu plus de temps pour les relativistes. Mais la guerre était finie.

La guerre du trou noir aurait dû s'achever début 1998. Mais Stephen Hawking était comme l'un de ces malheureux soldats qui errent dans la jungle pendant des années, sans savoir que les hostilités sont terminées. À ce moment-là, il était devenu un héros tragique. À cinquante-six ans, il n'était plus au faîte de ses capacités intellectuelles et ne pouvait pratiquement plus communiquer. Stephen n'a pas compris. Je suis certain que ce n'était pas à cause de ses limitations intellectuelles. Des échanges que j'ai eus avec lui bien après 1998, il est évident pour moi que son esprit restait extrêmement vif. Mais il avait subi de telles détériorations physiques qu'il était presque complètement enfermé dans sa propre tête. Sans moyen d'écrire une équation et avec des obstacles effroyables pour collaborer avec d'autres, il a dû se trouver dans l'incapacité de faire ce que font d'ordinaire les physiciens pour comprendre des travaux nouveaux et étranges. Stephen continua donc à combattre pendant un certain temps.

Peu après la publication de l'article de Witten, il y eut une nouvelle conférence à Santa Barbara, cette fois pour fêter l'holographie et la découverte de Maldacena. L'orateur qui prit la parole après dîner était Jeff Harvey (le H de CGHS) mais, au lieu de prononcer un discours, il a fait chanter et danser tout le monde sur un chant de victoire : *La Maldacena*, qui doit être chanté et dansé sur l'air de *La Macarena*¹.

1. *La Macarena* est un air de danse latino-américain du milieu des années 1990.

*Tu commenç' avec un' brane
Et cet' branep est BPS¹*

*Puis tu t'approch' de la brane
Et l'espace est AdS*

*Qui sait ce que c'la veut dire
Non pas moi, je le confesse*

Ehhhh ! Maldacena !

*Vers la limite infinie
Équations d'super Yang-Mills*

*Gravité sur une sphère
Et aussi des flux sans fin*

*Celui qui dit qu' c'est pareil
S'ra puni par l'hologramme*

Ehhhh ! Maldacena !

*Les trous noirs ont constitué
Pour nous tous un grand mystère*

*Les D-branes utilisons
En calcul D-entropie*

*Et quand la D-brane est chaude
C'est l'énergie qui est D-libre*

Ehhhh ! Maldacena !

*M-théorie est finie
C'est Juan qui a grand renom*

*Avons maîtrisé l' trou noir
Calculons en QCD*

*Reste le spectr' de glueball
Qu'est toujours en grand débat*

Ehhhh ! Maldacena² !

1. BPS est une propriété technique des D-branes. BPS est mis pour les trois auteurs qui l'ont découverte : Bogomol'nyi, Prasad et Sommerfield.

2. Chanson © Jeff Harvey (librement traduite).

De la physique nucléaire, ça ? Vous voulez rire !

Les sceptiques feront remarquer que tout ce que j'ai dit des propriétés quantiques des trous noirs – depuis l'entropie, la température et le rayonnement de Hawking jusqu'à la complémentarité du trou noir et au principe holographique – n'est que pure théorie sans une once de donnée expérimentale pour la confirmer. Malheureusement, il se pourrait bien qu'ils aient raison pendant très longtemps.

Cela dit, une liaison totalement inattendue s'est révélée récemment entre les trous noirs, la gravité quantique, le principe holographique et la physique nucléaire expérimentale. Cette liaison pourrait bien apporter une fois pour toutes un démenti à ceux qui affirment que ces théories ne peuvent recevoir de confirmation scientifique. À première vue, la physique nucléaire ne paraît pas être un terrain prometteur pour tester des idées telles que le principe holographique et la complémentarité du trou noir. La physique nucléaire n'est généralement pas considérée comme étant un sujet de pointe : elle est ancienne et la plupart des physiciens, moi compris, pensaient qu'elle avait épuisé ses capacités à nous apprendre quoi que ce soit de nouveau sur les principes fondamentaux. Du point de vue de la physique moderne, les noyaux sont comme des guimauves – de grosses boules qui s'écrabouillent parce qu'elles sont essentiellement faites de vide¹. Que pourraient-ils nous

1. Il est intéressant de calculer la densité de masse d'un nucléon en unités de Planck. Le rayon d'un proton est d'environ 10^{20} et sa masse d'environ 10^{-19} . Cela donne une masse par unité de volume de 10^{-79} .

apprendre sur la physique à l'échelle de Planck ? C'est surprenant mais, apparemment, beaucoup !

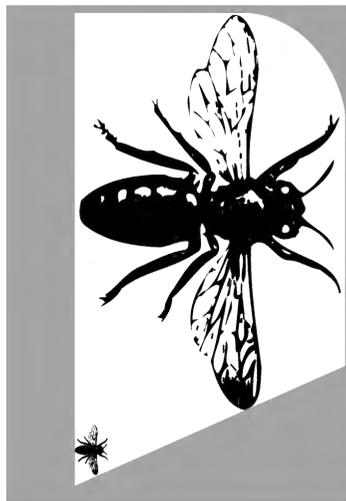
Les spécialistes de la théorie des cordes ont toujours été intéressés par les noyaux. Toute la préhistoire de cette théorie n'était que hadrons : protons, neutrons, mésons et glueballs. Comme les noyaux, ces particules sont grandes, composés de quarks et de gluons. Mais il semble qu'à une échelle cent milliards de milliards de fois plus grande que celle de Planck, la nature se répète. Les mathématiques de la physique des hadrons se révèlent être presque les mêmes que celles de la théorie des cordes. Cela semble très surprenant dans la mesure où les échelles sont très différentes : les nucléons peuvent être 10^{20} fois plus grands que des cordes fondamentales et oscillent 10^{20} fois plus lentement. Comment ces théories peuvent-elles être les mêmes, voire vaguement semblables ? Pourtant, elles le sont, d'une manière que nous allons clarifier. Et si les particules subnucléaires sont vraiment semblables aux cordes fondamentales, pourquoi ne pas tester les idées de la théorie des cordes dans les laboratoires de physique nucléaire ? En réalité, cela se fait depuis presque quarante ans.

La liaison entre hadrons et cordes est un des piliers de la physique des particules moderne mais, jusqu'à une date très récente, il n'était pas possible de tester l'analogie nucléaire de la physique des trous noirs. C'est cette situation qui est en train de changer.

Sur Long Island, à une centaine de kilomètres de Manhattan, au Brookhaven National Laboratory, des spécialistes de physique nucléaire font claquer les uns sur les autres des noyaux atomiques lourds simplement pour voir ce qui se passe. Le collisionneur relativiste d'ions lourds (RHIC)¹ accélère des noyaux d'or presque à la vitesse de la lumière – suffisamment rapidement pour que, lors des collisions, ils créent une énorme giclée d'énergie, une centaine de millions de fois plus chaude que la surface du Soleil. Les physiciens de Brookhaven ne s'intéressent pas aux bombes et autres technologies nucléaires. Ils ne sont animés que de curiosité pure – à propos des propriétés d'une nouvelle forme de matière. Comment ce matériel nucléaire chaud se comporte-t-il ? Est-ce un gaz ? Un liquide ? Reste-t-il assemblé ou s'évapore-t-il instantanément en particules séparées ? Des jets de particules de très haute énergie fusent-ils ?

1. RHIC pour Relativistic Heavy Ion Collider. (*N.d.T.*)

Comme je l'ai dit, la physique nucléaire et la gravité quantique se situent sur des échelles très différentes : quel rapport peuvent-elles avoir l'une avec l'autre ? La meilleure analogie que je connaisse fait appel à un des pires films jamais réalisés, un de ces vieux films d'horreur de l'époque du cinéma en plein air. Il mettait en scène une mouche monstrueuse. Je ne sais pas comment le film a été réalisé mais j'imagine qu'on a filmé une mouche tout à fait ordinaire et qu'on a agrandi l'image pour qu'elle occupe tout l'écran. L'image est projetée en mouvement très lent, ce qui donne de la mouche l'image sinistre d'un énorme oiseau hideux. Le résultat est terrifiant mais ce qui nous intéresse est qu'il illustre presque parfaitement la liaison entre gravitons et glueballs. Dans les deux cas, on a des cordes fermées mais le graviton est beaucoup plus petit et rapide qu'une glueball – environ 10^{20} fois plus petit et plus rapide. On dirait que les hadrons sont comme des images de cordes fondamentales agrandies et ralenties, pas seulement quelques centaines de fois, comme dans le cas de la mouche, mais un gigantesque 10^{20} fois.



Ainsi, à défaut de pouvoir faire entrer en collision des particules de la taille de Planck à des énergies prodigieuses pour réaliser des trous noirs, nous pouvons peut-être créer un impact entre leurs versions agrandies – glueballs, mésons ou nucléons – et créer une version grossie de trou noir. Mais cela ne nécessite-t-il pas des

quantités prodigieuses d'énergie ? Eh bien non. Et pour comprendre pourquoi, il nous faut nous rappeler ce que nous avons vu au chapitre 16 sur la relation contre-intuitive du XX^e siècle entre taille et masse : *ce qui est petit est lourd, ce qui est grand est léger*. Le fait que la physique nucléaire se situe sur une échelle immensément plus grande que la théorie des cordes fondamentales implique que le phénomène correspondant demande bien moins d'énergie répartie dans un volume beaucoup plus grand. Quand on introduit les nombres et qu'on fait les calculs, il en ressort que la collision entre noyaux ordinaires dans le RHIC devrait produire quelque chose de très semblable à un trou noir grossi, avec un mouvement lent.

Pour comprendre en quel sens des trous noirs sont créés par le RHIC, nous devons en revenir au principe holographique et à la trouvaille de Juan Maldacena. D'une façon que rien ne laissait présager, Maldacena avait découvert que deux théories mathématiques différentes étaient en réalité la même – étaient « duales l'une de l'autre », comme on dit dans le jargon de la théorie des cordes. L'une était la théorie des cordes, avec ses gravitons et ses trous noirs, quoique dans un espace anti de Sitter (AdS) de dimension $(4 + 1)$. (Au chapitre 22, pour des raisons de visualisation, j'ai pris la liberté de diminuer la dimension de l'espace. Dans ce chapitre, je rétablis la dimension manquante.)

Quatre dimensions d'espace, cela en fait une de trop pour la physique nucléaire mais souvenez-vous du principe holographique : tout ce qu'il y a dans un AdS doit pouvoir être décrit complètement par une théorie mathématique travaillant avec une dimension spatiale de moins. Maldacena ayant commencé à travailler avec quatre dimensions, la théorie holographique duale n'en a que trois, comme dans l'espace ordinaire. Se pourrait-il que cette description holographique soit semblable à l'une quelconque des théories que nous utilisons pour les descriptions de la physique conventionnelle ?

Il se trouve que la réponse est oui : le dual holographique est mathématiquement tout à fait semblable à la chromodynamique quantique (QCD), la théorie des quarks, des gluons, des hadrons et des noyaux.

Gravité quantique dans un AdS \longleftrightarrow QCD

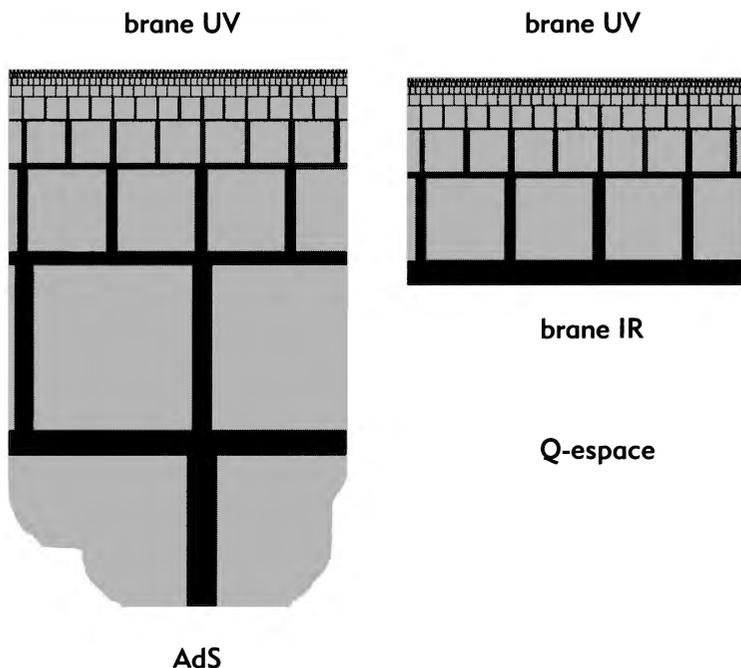
À mes yeux, le principal intérêt du travail de Maldacena était qu'il confirmait le principe holographique et apportait des éclaircissements sur le fonctionnement de la gravité quantique. Mais Maldacena et Witten voyaient une autre possibilité. Ils se rendirent compte – je dois dire que c'était brillant – que le principe holographique était à double sens. Pourquoi ne pas le lire dans l'autre sens ? C'est-à-dire utiliser ce que nous savons de la gravité – dans ce cas de la gravité dans un AdS en $(4 + 1)$ dimensions – pour nous apprendre des choses sur la théorie quantique des champs ordinaire ? Pour moi, c'était un retournement totalement inattendu, un bonus du principe holographique auquel je n'avais jamais pensé.

Pour réaliser cela, il fallait accomplir un petit travail. La QCD n'est pas tout à fait la même que la théorie de Maldacena mais la différence principale peut facilement être prise en compte en modifiant l'AdS de façon simple. Regardons à nouveau l'espace AdS vu d'un point situé très près du bord (là où le dernier démon visible s'évanouit). Je vais appeler désormais ce bord *brane UV*¹, UV pour ultraviolet – la même expression que celle que nous employons pour une lumière de très petite longueur d'onde. (Avec les années, le terme *ultraviolet* est utilisé pour n'importe quel phénomène qui se situe à des petites échelles. Dans notre contexte, il renvoie au fait que les anges et les démons près du bord du dessin d'Escher s'amenuisent jusqu'à des tailles infinitésimales.) Le mot *brane* dans *brane UV* est vraiment inapproprié mais, puisqu'il s'est imposé, je l'emploierai. La brane UV est une surface près du bord.

Imaginez que vous alliez depuis cette brane UV vers l'intérieur, là où les carrés démons grandissent et où les horloges ralentissent sans limite. Les objets qui sont petits et rapides près de la brane UV deviennent grands et lents à mesure que nous nous enfonçons dans l'AdS. Mais un AdS n'est pas tout à fait le bon outil pour décrire la QCD. Bien que la différence soit minime, l'espace modifié mérite d'avoir son propre nom. Appelons-le un *Q-espace*. Comme l'AdS, le Q-espace possède non seulement une brane UV, où tout rapetisse et s'accélère, mais aussi un second bord appelé *brane IR*. (IR pour infrarouge, qui est le terme utilisé pour la lumière de très grande longueur d'onde.) La brane IR est un second bord – une sorte de barrière impénétrable où anges et démons attei-

1. Beaucoup de ce que je décris ici en quelques paragraphes est très clairement expliqué dans l'excellent livre de Lisa Randall *Warped Passages, Chemins tortus*.

gnent une taille maximale. Si la brane UV est le plafond d'un gouffre sans fond, un Q-espace est une pièce ordinaire avec plafond et sol. En laissant de côté la dimension temporelle et en représentant seulement deux dimensions spatiales, un AdS et un Q-espace ressemblent à ceci :



Imaginons que nous placions une particule du genre corde dans un Q-espace en la mettant d'abord près de la brane UV. Tout comme les anges et les démons qui l'entourent, elle apparaîtra comme étant très petite – peut-être de la taille de Planck – et oscillant très vite. Mais, si la même particule se déplace vers la brane IR, elle semblera grossir, presque comme si elle était projetée sur un écran qui s'éloigne. Regardons maintenant l'oscillation de la corde : cette vibration réalise une sorte d'horloge qui, comme toutes ses semblables, va plus vite près de la brane UV et plus lentement quand elle se déplace vers la brane IR. Une corde près de l'extrémité IR ne ressemblera pas seulement à une gigantesque version enflée de son double UV rapetissé, elle oscillera aussi bien plus lentement. Cette différence rappelle beaucoup celle entre les mouches réelles et leurs images au cinéma – ou la différence entre les cordes fondamentales et leurs contreparties nucléaires.

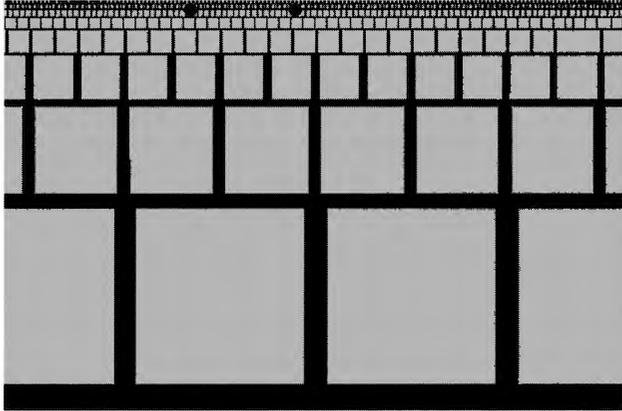
Si les super-petites particules à la taille de Planck de la théorie des cordes « vivent » près de la brane UV et que leurs versions agrandies – les hadrons – vivent près de la brane IR, à quelle distance se trouvent-elles les unes des autres ? En un certain sens, pas très loin : il faudrait traverser environ 66 carrés démons pour aller des objets à la taille de Planck aux hadrons. Mais rappelez-vous qu'à chaque étape on double la taille. Doubler sa taille 66 fois est la même chose que grandir d'un facteur 10^{20} .

Il y a deux façons de voir la similitude entre la théorie des cordes fondamentales et la physique nucléaire. La façon la plus conservatrice est de penser qu'elle est fortuite, plus ou moins comme la similitude entre les atomes et le système solaire. Cette dernière a eu son utilité aux premiers temps de la physique atomique. Niels Bohr a utilisé pour l'atome les mêmes mathématiques que Newton pour le système solaire. Mais ni Bohr ni personne ne pensait vraiment que le système solaire était une version agrandie d'un atome. En suivant cette façon de voir, la liaison entre gravité quantique et physique nucléaire est aussi une simple analogie mathématique, mais une analogie commode qui nous permet d'utiliser les mathématiques de la gravité pour expliquer certains traits de physique nucléaire.

La façon de voir la plus passionnante est de considérer que les cordes nucléaires sont vraiment les mêmes objets que les cordes fondamentales mais interprétées au travers de lentilles déformantes qui étirent leur image et les ralentissent. Selon cette façon de voir, quand une particule (ou une corde) se trouve près de la brane UV, elle apparaît comme étant petite, pleine d'énergie, oscillant très vite. Elle ressemble à une corde fondamentale, elle se comporte comme une corde fondamentale – elle doit donc être une corde fondamentale. Par exemple, une corde fermée située à la brane UV pourrait être un graviton. Mais la même corde, si elle se déplace vers la brane IR, ralentit et grandit. Par tous les aspects, elle ressemble à une glueball et se comporte comme elle. Dans cette façon de voir, gravitons et glueballs sont exactement les mêmes objets, en dehors du fait qu'ils ne se trouvent pas au même endroit du sandwich entre les branes.

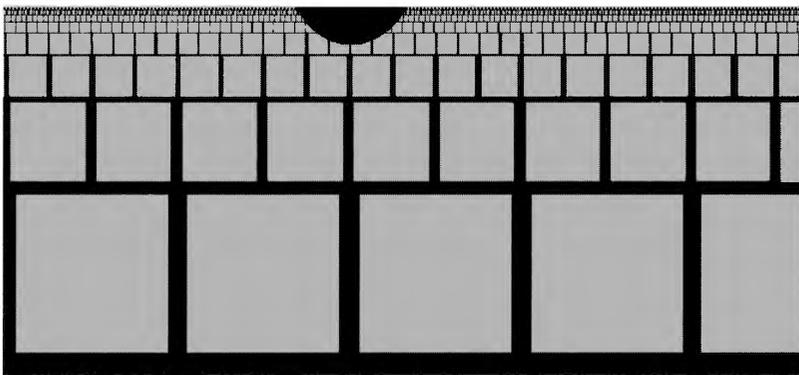
Imaginons deux gravitons (des cordes près de la brane UV) sur le point d'entrer en collision.

Deux particules sur le point d'entrer en collision
près de la brane UV



Si elles ont suffisamment d'énergie, quand elles se rencontrent près de la brane UV, un petit trou noir ordinaire se forme : une larve d'énergie coincée sur la brane UV. Imaginez-la comme une goutte de liquide suspendue au plafond. Les bits d'information qui constituent son horizon sont de la taille de Planck.

UV

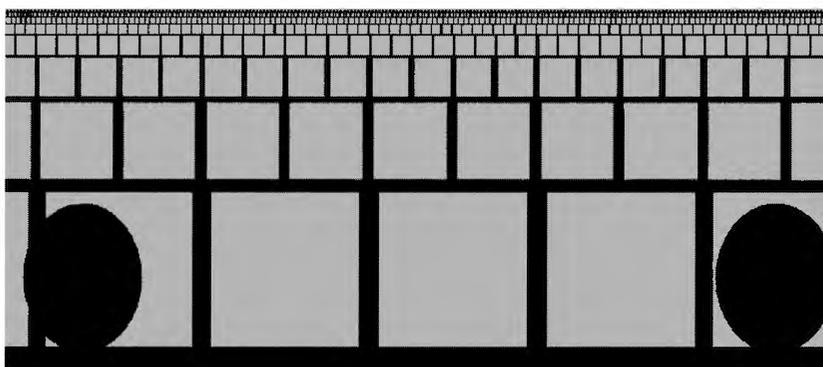


IR

C'est bien entendu exactement l'expérience que nous ne serons probablement jamais en mesure de réaliser.

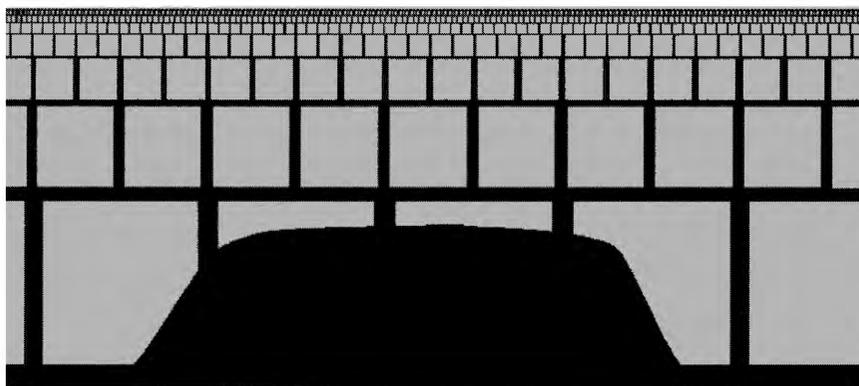
Mais remplaçons maintenant les gravitons par deux noyaux (près de la brane IR) et, *eux*, cognons-les ensemble.

**Deux particules sur le point d'entrer en collision
près de la brane IR**



C'est là que la puissance de la dualité se fait sentir. D'un côté, nous pouvons tout penser dans la version en quatre dimensions dans laquelle deux objets se heurtent et forment un trou noir. Cette fois, le trou noir se trouvera près de la brane IR – une grosse flaque sur le sol. Quelle est l'énergie requise ? De loin moins que lorsque le trou noir se forme près de la brane UV. En fait, il s'agit d'une énergie qui entre facilement dans la gamme du RHIC.

UV



IR

Nous pouvons aussi nous placer du point de vue tridimensionnel. Dans ce cas, hadrons et noyaux entrent en collision et produisent une giclée de quarks et gluons.

À l'origine, avant que quiconque ne s'aperçoive de la liaison potentielle de la QCD avec la physique des trous noirs, les experts en QCD s'attendaient à ce que l'énergie de la collision réapparaisse sous forme d'un gaz de particules qui se dissiperait très vite avec une résistance très faible. Mais ce qu'ils avaient observé était différent : l'énergie se maintenait groupée dans ce qui ressemblait beaucoup plus à une goutte de fluide – appelons-la *soupe chaude de quarks*. Cette dernière n'est pas un liquide de n'importe quelle sorte : il a des propriétés rhéologiques très surprenantes qui ne sont, pour l'essentiel, partagées par rien d'autre que l'horizon d'un trou noir.

Tout fluide a une viscosité. Il s'agit d'une sorte de frottement qui se produit entre les couches d'un fluide quand elles glissent les unes sur les autres. La viscosité est ce qui distingue un fluide très visqueux comme le miel d'un autre qui l'est beaucoup moins comme l'eau. Il ne s'agit pas seulement d'un concept qualitatif. Au contraire, il existe pour chaque fluide une valeur numérique précise appelée *viscosité de cisaillement*¹.

Les théoriciens appliquèrent initialement des méthodes d'approximation standard et conclurent que la soupe chaude de quarks devrait avoir une viscosité très élevée. Tout le monde fut stupéfait quand il s'avéra qu'elle était incroyablement petite² – tout le monde sauf quelques spécialistes de physique nucléaire qui se trouvaient avoir des notions en théorie des cordes.

D'après une certaine mesure quantitative de la viscosité, la soupe chaude de quarks est le moins visqueux des fluides connus – bien moins que l'eau. Même l'hélium liquide superfluide (le précédent champion en basse viscosité) est bien plus visqueux.

Y a-t-il quelque chose dans la nature qui pourrait rivaliser avec la basse viscosité de la soupe chaude de quarks ? Oui, mais il ne s'agit pas d'un fluide ordinaire. L'horizon d'un trou noir se comporte comme un fluide quand il est perturbé. Par exemple, si un petit trou noir tombe dans un plus grand, cela crée temporairement un renflement sur l'horizon, semblable à celui qu'une goutte de

1. Le mot *cisaillement* renvoie au glissement d'une couche plus loin qu'une autre.

2. Précisément, c'est le quotient de la viscosité par l'entropie du fluide qui est aussi petit.

miel laisse quand elle tombe à la surface d'un pot de miel. La goutte sur l'horizon se disperse exactement comme le fait un fluide visqueux. Cela fait longtemps que les physiciens des trous noirs ont calculé la viscosité d'un horizon et, traduite en termes de fluides, cela battait sans problème l'hélium superfluide. Quand les théoriciens des cordes commencèrent à soupçonner un lien entre trous noirs et collisions nucléaires¹, ils se sont rendu compte que c'est à la soupe chaude de quarks que l'horizon d'un trou noir ressemble le plus.

Qu'est-ce qui finit par arriver à la goutte de fluide ? Comme un trou noir, elle s'évapore – en de nombreuses particules, y compris des nucléons, des mésons, des photons, des électrons et des neutrinos. Viscosité et évaporation ne sont que deux des propriétés qu'horizons et soupe chaude de quarks ont en commun.

Le fluide nucléaire est désormais l'objet d'études intenses pour voir si d'autres propriétés ont de semblables liens avec la physique des trous noirs. Si la tendance se poursuit, cela voudra dire qu'une opportunité extraordinaire nous est offerte de confirmer les théories de Hawking et Bekenstein aussi bien que la complémentarité du trou noir et le principe holographique. Cela grâce à une fenêtre remarquable sur le monde de la gravité quantique dont la taille est agrandie et la fréquence ralentie, ce qui rend la longueur de Planck pas beaucoup plus petite qu'un proton.

On a dit que la paix n'est rien d'autre qu'un bref intervalle entre deux guerres. Mais, en ce qui concerne la science, Thomas Kuhn a expliqué fort justement que c'est l'inverse qui est vrai : la plus grande partie de la « science ordinaire » se fait durant les longues périodes routinières de paix entre deux bouleversements. La guerre du trou noir a conduit à une restructuration violente des lois de la physique mais nous la voyons désormais faire son chemin dans les activités quotidiennes les plus prosaïques de la physique. Comme tant d'autres idées révolutionnaires avant lui, le principe holographique passe d'un changement radical de paradigme à un outil de travail de tous les jours de – c'est une surprise ! – la physique nucléaire.

1. Pavel Kovtun, Dam T. Son et Andrei O. Starinets – trois théoriciens de la physique de l'université de Washington à Seattle – ont été les premiers à reconnaître les implications du principe holographique pour les propriétés de viscosité de la soupe chaude de quarks.

Humilité

Nous ne sommes qu'une espèce évoluée de singes sur une planète mineure d'une étoile moyenne. Mais nous pouvons comprendre l'Univers. C'est ce qui fait de nous quelque chose de tout particulier.

STEPHEN HAWKING

Nous reprogrammer pour la relativité a déjà été chose difficile ; pour la mécanique quantique, ce fut bien pire. Prédicibilité et déterminisme ont dû quitter la scène, il a fallu remplacer les règles de la logique classique faillies par la logique quantique. Incertitude et complémentarité trouvèrent leur expression en termes d'espaces de Hilbert de dimension infinie abstraits, de relations mathématiques de commutation et autres curieuses créations de l'esprit.

Au cours de toute la reprogrammation du xx^e siècle, en tout cas jusqu'au milieu des années 1990, la réalité de l'espace-temps et l'objectivité des événements n'ont pratiquement jamais été remis en cause. Il était universellement admis que la gravité quantique ne jouait aucun rôle sur les propriétés de l'espace-temps à grande échelle. Stephen Hawking et son paradoxe de l'information a été celui qui nous a obligés à sortir involontairement, et passablement à contrecœur, de ce cadre de pensée.

Les nouvelles façons de voir en physique, qui se sont développées depuis un peu plus d'une dizaine d'années, mettent en jeu une nouvelle sorte de relativité et de complémentarité quantique. La signification objective de la simultanéité (de deux événements) a fait fiasco en 1905 mais le concept même d'événement était resté, solide comme le roc. Si se produit une réaction nucléaire dans le

Soleil, tous les observateurs seront bien d'accord que c'est dans le Soleil qu'elle a eu lieu. Personne ne détectera qu'elle a eu lieu sur la Terre. Mais quelque chose de nouveau nous est venu de la puissante gravité d'un trou noir, quelque chose qui sape l'objectivité des événements. Les événements qu'un observateur en chute libre considère comme se passant profondément à l'intérieur d'un énorme trou noir, un autre les repérera à l'extérieur de l'horizon, brouillés parmi les photons du rayonnement de Hawking. Un événement ne peut pas se dérouler à la fois au-delà de l'horizon *et* en deçà de lui. Par contre, il peut, selon l'endroit où se trouve l'expérimentateur, se dérouler après l'horizon *ou* avant. Mais même la totale étrangeté de la complémentarité est éclipsée par l'insolite principe holographique. Notre solide monde tridimensionnel paraît n'être qu'une espèce d'illusion, les choses réelles se situant à l'extérieur, sur le bord de l'espace.

Pour la plupart d'entre nous, l'effondrement de concepts comme la simultanéité (en relativité restreinte) et du déterminisme (en mécanique quantique) ne sont rien de plus que des bizarreries qui n'intéressent que quelques physiciens. En réalité, le contraire est vrai : c'est la navrante lenteur des mouvements humains et la lourde masse des 10^{28} atomes qui constituent le corps humain qui sont de bizarres exceptions de la nature. Il y a en gros 10^{80} particules élémentaires dans l'univers pour chaque humain. La plupart d'entre elles se déplacent à des vitesses proches de celle de la lumière et sont par nature incertaines – si ce n'est sur leur position, c'est sur la vitesse avec laquelle elles se déplacent.

La faiblesse de la gravité que nous connaissons sur Terre est aussi une exception. L'univers est né dans un état de brutale expansion : chaque point de l'espace était entouré de tous côtés par des horizons à des distances plus petites qu'un simple proton. Les habitants de l'univers les plus remarquables, les galaxies, sont construits autour de trous noirs géants qui avalent en permanence étoiles et planètes. Sur chaque groupe de 10 000 000 000 bits d'information dans l'univers, 9 999 999 999 sont associés à l'horizon de trous noirs. Il devrait paraître évident que nos idées naïves à propos d'espace, de temps et d'information sont tout à fait inadaptées pour comprendre la plupart des choses dans la nature.

Notre reprogrammation pour la gravité quantique est loin d'être achevée. Je ne crois pas que nous ayons déjà un cadre approprié pour remplacer le paradigme plus ancien sur l'objectivité de

l'espace-temps. Les puissantes mathématiques de la théorie des cordes sont une aide : elles nous offrent un cadre rigoureux pour tester des idées dont, autrement, nous ne pourrions parler que d'un point de vue philosophique. Mais la théorie des cordes est un chantier inachevé. Nous ne connaissons pas les principes qui la fondent ; nous ne savons pas non plus s'il s'agit du niveau le plus profond de la réalité ou simplement d'une autre théorie passagère sur notre chemin. La guerre du trou noir nous a donné des leçons très importantes et inattendues mais qui ne sont qu'un indice de la distance qui sépare la réalité de notre modèle mental, même reprogrammé pour la relativité et la mécanique quantique.

Horizons cosmiques

La guerre du trou noir est terminée (cette affirmation contrariera peut-être une poignée de gens qui poursuivent le combat) mais elle était à peine finie que la nature, cette grande empêchuse de tourner en rond, nous a réservé une autre surprise. À peu près en même temps que la découverte de Maldacena, les physiciens ont commencé à être convaincus (par les cosmologistes) que nous vivons dans un monde pourvu d'une *constante cosmologique* non nulle. Cette incroyablement petite constante de la nature¹, de loin plus petite que toute autre constante physique, est le principal facteur qui détermine l'histoire future de l'univers.

La constante cosmologique, aussi connue sous le nom d'énergie noire, a été une épine dans le pied de la physique pendant presque un siècle. En 1917, Einstein s'interrogea sur une sorte d'antigravité qui ferait que tout, dans l'univers, se repousse, contrebalançant l'attraction usuelle de la gravité. Il ne s'agissait absolument pas d'une spéculation vaine : elle s'appuyait fermement sur les mathématiques de la relativité générale. Les équations autorisaient un autre terme qu'Einstein a qualifié de cosmologique. L'intensité de cette nouvelle force était proportionnelle à une nou-

1. La valeur numérique de la constante cosmologique est d'environ 10^{-123} en unités de Planck. On a soupçonné l'existence d'une constante cosmologique au milieu des années 1980 au sein d'un petit nombre de cosmologistes qui observaient attentivement les données astronomiques. Mais cela n'a pas eu beaucoup d'incidence dans le monde des physiciens pendant plus d'une décennie. Sa valeur extraordinairement petite a berné presque tous les physiciens, les empêchant de croire à son existence.

velle constante de la nature, la supposée constante cosmologique, représentée par la lettre grecque lambda (Λ). Si Λ est positive, le terme cosmologique engendre une force répulsive qui augmente avec la distance. Si elle est négative, la nouvelle force est attractive. Si elle est nulle, il n'y a pas de force et nous pouvons l'ignorer.

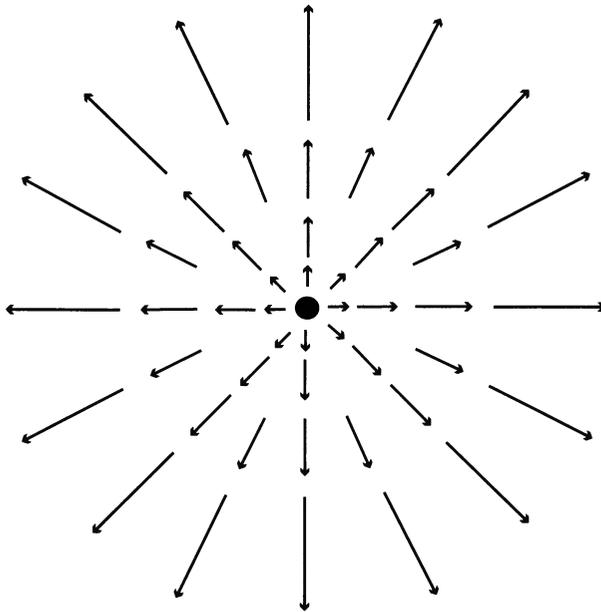
Au début, Einstein pensait que Λ était positive mais il en vint très vite à rejeter l'idée tout entière, disant de cette dernière, dans une déclaration célèbre, qu'elle était sa pire erreur. Jusqu'à la fin de sa vie, il a posé $\Lambda = 0$ dans toutes ses équations. La plupart des physiciens étaient d'accord avec Einstein, même s'ils ne comprenaient pas pourquoi Λ devrait être absente des équations. Mais, dans la dernière décennie, l'argument venant de l'astronomie plaidant pour une petite constante cosmologique positive a commencé à convaincre.

Cette dernière et tous les casse-tête et paradoxes qu'elle a créés forment le sujet de mon livre *Le Paysage cosmique*¹. Je ne vous parlerai ici que de sa conséquence la plus importante : la force répulsive, lorsqu'elle agit à des distances cosmologiques, fait que l'espace est en expansion *exponentielle*. Il n'y a rien de nouveau dans le fait que l'univers soit en expansion mais sa vitesse diminuerait progressivement sans la constante cosmologique. En fait, la situation pourrait même s'inverser et commencerait alors une contraction de l'univers se terminant par une implosion dans un gigantesque choc cosmique. Au lieu de cela, corollaire de l'existence de la constante cosmologique, il semble que l'univers double sa taille environ tous les quinze milliards d'années et tout laisse penser que cela continuera indéfiniment.

Dans un univers en expansion – ou, pour ce que nous allons voir, un ballon en expansion – plus grande est la distance entre deux points, plus vite ils s'éloignent l'un de l'autre. La relation entre distance et vitesse est appelée loi de Hubble et elle dit que la vitesse de récession entre deux points quelconques est proportionnelle à leur distance. Tout observateur, où qu'il se trouve, en regardant autour de lui voit les galaxies distantes s'éloigner à une vitesse proportionnelle à leur distance.

Si vous regardez suffisamment loin dans un tel univers en expansion, vous en arriverez à un point où les galaxies s'éloignent

1. *Op. cit.*



de vous à la vitesse de la lumière. Une des propriétés les plus remarquables d'un univers en expansion exponentielle est que la distance à ce point ne change jamais. Il apparaît que, dans notre propre univers, à une distance d'environ quinze milliards d'années-lumière, les choses s'éloignent à la vitesse de la lumière mais, plus important, il en sera ainsi pour l'éternité.

Il y a là quelque chose de familier, bien que différent. Cela fait venir à l'esprit le lac des têtards du chapitre 2. Arrivée à un certain point, Alice, si elle se laisse emporter, dépassera le point de non-retour et s'éloignera de Bob à la vitesse du son. Quelque chose de ce genre se produit à grande échelle. Où que nous regardions, les galaxies dépassent le point à partir duquel elles s'éloignent de nous plus vite que le déplacement de la lumière. Chacun de nous est entouré d'un *horizon cosmique* – une sphère où les choses s'éloignent à la vitesse de la lumière – et aucun signal ne peut nous parvenir d'au-delà de l'horizon. Quand une étoile dépasse le point de non-retour, elle est partie pour toujours. Très loin, à quelque quinze milliards d'années-lumière, notre horizon cosmique est en train d'avaloir galaxies, étoiles et, probablement, même la vie. Tout se passe comme si nous vivions tous dans notre propre trou noir privé inversé...



Y a-t-il vraiment des mondes comme le nôtre qui ont, il y a longtemps, dépassé notre horizon et ont perdu tout rapport avec quoi que ce soit que nous pourrions percevoir ? Pire encore, l'essentiel de l'univers est-il pour toujours au-delà de notre connaissance ? Pour certains physiciens, c'est extrêmement perturbant. Il y a une philosophie qui dit que, si quelque chose n'est pas observable – pas observable pour des raisons principielles –, elle ne fait pas partie de la science. S'il n'y a aucun moyen d'infirmier ou confirmer une hypothèse, elle relève du domaine de la spéculation métaphysique, comme l'astrologie et le spiritualisme. Avec ce critère, l'essentiel de notre univers n'a pas de réalité scientifique – ce n'est qu'un produit de notre imagination.

Mais il est quand même difficile de congédier la plus grande partie de notre univers comme étant un non-sens. Rien ne prouve que les galaxies se dispersent ou disparaissent à l'horizon. L'observation astronomique indique qu'elles vont aussi loin que l'œil, ou le télescope, peut voir. Comment comprendre cette situation ?

Il y a eu dans le passé d'autres circonstances où des objets « inobservables » avaient été éliminés comme non scientifiques. Les émotions des autres en sont un exemple notable. Une école tout entière de psychologie, le béhaviorisme, s'était formée sur le principe qu'émotions et états internes de la conscience étant non observables, ils ne devaient jamais être évoqués dans une discus-

sion scientifique. Seuls les comportements des sujets de l'expérimentation – le mouvement de leur corps, les expressions de leur visage, leurs température et pression sanguine – étaient des proies idéales pour la psychologie béhavioriste. Cette école a exercé une énorme influence au milieu du xx^e siècle mais, aujourd'hui, la plupart des gens considèrent ce point de vue comme extrémiste. Peut-être nous faut-il simplement accepter des mondes au-delà de l'horizon de la même façon que nous acceptons que les autres aient une vie intérieure impénétrable ?

Mais il semble qu'il y ait une meilleure réponse. Les propriétés des horizons cosmiques semblent être très semblables à celles des trous noirs. Les mathématiques régissant un univers en accélération (en expansion exponentielle) impliquent que, alors que les choses s'approchent de l'horizon cosmique, nous les voyons ralentir. Si nous pouvions envoyer un thermomètre au bout d'un long câble au voisinage de l'horizon cosmique, nous découvririons que la température augmente, se rapprochant de la température infinie de l'horizon d'un trou noir. Cela veut-il dire que tous les habitants de ces planètes distantes se font rôtir ? La réponse est : ni plus ni moins qu'ils le seraient près de l'horizon d'un trou noir. Pour un observateur suivant le mouvement, dépasser l'horizon cosmique est un non-événement, un point de non-retour mathématique. Mais nos observations, complétées d'un peu d'analyse mathématique, indiqueraient qu'ils s'approchent d'une zone où règne une température incroyable.

Qu'arrive-t-il à leurs bits d'information ? Les mêmes arguments que Hawking a utilisés pour prouver que les trous noirs ont un rayonnement de corps noir nous disent que les horizons cosmiques rayonnent aussi. Dans ce cas, le rayonnement n'est pas vers l'extérieur mais vers l'intérieur, comme si nous vivions dans une pièce avec des murs radiants, chauds. Vu par nous, cela apparaîtra comme si, lorsque les choses se déplacent vers l'horizon, elles sont chauffées et rayonnées en retour sous forme de photons. Se pourrait-il qu'il y ait un principe de complémentarité cosmique ?

Pour un observateur situé à l'intérieur d'un horizon cosmique, ce dernier est une couche composée d'atomes d'horizon qui absorbent, mélangent puis renvoient tous les bits d'information. Pour un observateur en chute libre traversant l'horizon cosmique, ce dépassement est un non-événement.

Mais, aujourd'hui, nous comprenons très peu de choses sur les horizons cosmiques. La signification d'objets au-delà de l'horizon – qu'ils soient réels et quel rôle qu'ils jouent dans notre description de l'univers – est peut-être la question la plus profonde de la cosmologie.

Chutes de pierres et orbites des planètes sont de pâles indices de ce dont la gravité s'occupe vraiment. Les trous noirs constituent son lieu de prédilection. Les trous noirs ne sont pas seulement des étoiles denses : ils sont plutôt les ultimes réservoirs d'information, où les bits sont rangés aussi serrés qu'une pile de boulets de canon mais sur une échelle plus petite d'un facteur 10^{34} . Voilà ce dont s'occupe la gravité quantique : information et entropie, rangées bien serrées.

Hawking a peut-être donné la mauvaise réponse à sa propre question ; mais la question en elle-même était l'une des plus profondes de l'histoire récente de la physique. Peut-être était-il programmé de façon trop classique – trop enclin à voir l'espace-temps comme une toile préexistante, bien que flexible, sur laquelle la physique est peinte – pour reconnaître les profondes implications d'une conciliation de la conservation de l'information quantique avec la gravitation. Mais la question elle-même a peut-être ouvert la voie pour la prochaine importante révolution conceptuelle en physique. Il n'y a pas beaucoup de physiciens dont on puisse dire cela.

Quant à l'héritage de Hawking, il est forcément très grand. D'autres avant lui savaient que le fossé entre gravité et théorie quantique devrait être comblé tôt ou tard mais Bekenstein et Hawking ont été les premiers à pénétrer dans cette contrée lointaine et à en rapporter de l'or. J'espère que les historiens des sciences du futur diront que c'est par eux que tout a commencé.

S'il est un homme qui n'a jamais failli, celui-là ne peut être grand.

HERMAN MELVILLE

La physique en résumé

La confusion et le désordre règnent ; cause et effet sont en panne ; les certitudes s'envolent ; toutes les anciennes règles font

faillite : voilà ce qu'il advient quand le paradigme dominant est dans l'impasse.

De nouvelles structures apparaissent. Au début, elles n'ont pas de sens mais ce sont des structures. Que faire ? S'en saisir, les classer, les quantifier, les codifier dans de nouvelles mathématiques, voire de nouvelles règles de logique s'il le faut. Remplacer le vieux programme par le nouveau et s'y accoutumer. De l'intimité naîtra l'habitude, en tout cas l'idée fera son chemin.

Très probablement, nous sommes encore des débutants confus remplis d'images mentales erronées et la réalité ultime reste loin de notre portée. On pense à la vieille expression des cartographes – *terra incognita*. Plus nous découvrons, moins nous paraissions en savoir. Voilà, en résumé, ce qu'est la physique.

Épilogue

Stephen Hawking a fêté son soixantième anniversaire en 2002. Personne n'y aurait cru, à commencer par ses médecins. L'événement méritait d'être célébré – une vraiment grande fête d'anniversaire – et je me suis retrouvé une nouvelle fois à Cambridge, au milieu de centaines d'autres – physiciens, journalistes, rock stars, musiciens, un imitateur de Marilyn Monroe, des danseuses de french cancan – et d'une abondance de nourriture, vin, alcools... C'était un show médiatique géant en même temps qu'une conférence de physique sérieuse. Quiconque avait représenté quelque chose dans la vie scientifique de Stephen fit un discours, y compris Stephen lui-même. Voici un court extrait du mien.

Stephen, comme nous le savons tous, est de loin la personne la plus têtue et la plus exaspérante de l'univers. Je crois qu'on peut qualifier d'antagonistes nos relations scientifiques. Nous avons eu des désaccords profonds sur des questions profondes concernant les trous noirs, l'information et ce genre de choses. Il m'a parfois amené à m'arracher les cheveux de frustration – et vous pouvez manifestement en voir le résultat. Je peux vous assurer que lorsque nous avons commencé à nous disputer, il y a plus de vingt ans, j'avais tous mes cheveux.

Arrivé là, je pouvais voir Stephen au fond de l'auditorium avec son grand sourire narquois. Je poursuivis.

Je peux aussi dire que, de tous les physiciens que j'ai connus, il est celui qui a eu la plus grande influence sur moi et ma façon de penser. À peu près tout ce à quoi j'ai réfléchi depuis en gros 1983 fut, d'une

façon ou d'une autre, en réponse à sa question profondément pénétrante sur le sort de l'information qui tombe dans un trou noir. Bien que je pense fermement que sa réponse fut la mauvaise, la question, de même que son exigence d'une réponse convaincante, nous ont forcés à repenser les fondements de la physique. Le résultat est qu'un paradigme complètement nouveau est en train de prendre forme. Je suis très honoré d'être présent ici pour célébrer les contributions monumentales de Stephen et, tout particulièrement, sa merveilleuse obstination.

Chacun de ces mots était sincère.

Je ne me rappelle que trois autres discours. Deux d'entre eux étaient de Roger Penrose. Je ne sais plus pourquoi Roger a fait deux discours, mais il les a faits. Dans le premier, il avançait qu'il fallait que l'information fût perdue dans l'évaporation d'un trou noir. Les arguments étaient ceux que Stephen avait mis en avant vingt-six ans plus tôt et Roger maintenait que lui comme Stephen y croyaient toujours. J'ai été surpris dans la mesure où, pour ma part (et celle de quiconque avait suivi les développements récents), la théorie de la matrice, la découverte de Maldacena et les calculs d'entropie de Strominger et Vafa avaient enfin résolu la question.

Mais, dans son second discours, Roger maintint que le principe holographique et le travail de Maldacena étaient basés sur une série de méprises. Formulé simplement, son argument était : « Comment se pourrait-il que la physique puisse être décrite dans un plus grand nombre de dimensions par une théorie comportant moins de dimensions ? » Je crois qu'il n'y avait pas suffisamment réfléchi. Roger et moi avons été amis pendant quarante ans ; je sais qu'il est un rebelle, toujours à batailler contre la sagesse de base. Je n'aurais pas dû être surpris de le voir en position de contestation.

L'autre discours qui m'est resté en mémoire est celui de Stephen : pas tant pour ce qu'il y a dit que pour ce qui n'y était pas. Il rappela brièvement les grandes étapes de sa carrière – cosmologie, rayonnement de Hawking, excellentes bandes dessinées – mais ne dit pas un seul mot de la perte de l'information. Était-il possible qu'il ait commencé à douter ? Je l'imagine.

Ensuite, dans une conférence de presse en 2004, Hawking annonça qu'il avait changé d'avis. Il expliqua que ses recherches les plus récentes étaient finalement venues à bout de son propre paradoxe : il semble que, finalement, l'information s'écoule hors des trous noirs et se retrouve dans les produits de l'évaporation.

Selon Stephen, d'une façon ou d'une autre, le mécanisme a été ignoré jusque-là mais il l'avait enfin identifié et communiquerait ses nouvelles conclusions dans une conférence à venir à Dublin. Les médias étaient alertés et la conférence était attendue impatiemment.

Les journaux ont aussi rapporté que Stephen s'acquitterait d'un pari auprès de John Preskill (celui qui m'avait tracassé à Santa Barbara avec son ingénieuse expérience de pensée). En 1997, John avait parié avec Stephen que l'information *s'échappait vraiment* des trous noirs. L'enjeu était une encyclopédie sur le base-ball.

Très récemment, j'ai appris que Don Page, en 1980, avait fait un pari semblable avec Stephen. Comme je l'avais soupçonné à travers son exposé de Santa Barbara, il était resté sceptique sur les affirmations de Stephen depuis le début. Le 23 avril 2007, deux jours avant que je n'écrive ce paragraphe, Stephen lui donna raison formellement. Don a été assez aimable pour m'envoyer une copie du contrat original – un pari d'une livre sterling contre un dollar US – avec la concession signée de Stephen. La tache sombre à la fin est l'empreinte du pouce de Stephen.

How Predictable is Quantum Gravity?

Don Page bets Stephen Hawking one pound Sterling that strong quantum cosmic censorship holds, namely, that a pure initial state composed entirely of regular field configurations on complete, asymptotically flat hypersurfaces will have a unique S-matrix evolution under the laws of physics to a pure final state composed entirely of regular field configurations on complete, asymptotically flat hypersurfaces.

Stephen Hawking bets Don Page \$1.00 that in quantum gravity the evolution of such a pure initial state can be given in general only by a \mathbb{H} -matrix to a mixed final state and not always by an S-matrix to a pure final state.

"I concede in light of the weakness of the \mathbb{H} "

Stephen Hawking, 23 April 2007

Don N. Page
Stephen Hawking



À quel point la gravité quantique
est-elle prédictible ?

Don Page parie avec Stephen Hawking une livre sterling sur ce que la puissante censure cosmique quantique tient pour acquis, à savoir qu'un pur état initial entièrement composé de configurations régulières de champ sur des hypersurfaces asymptotiquement plates aura une unique évolution de matrice de diffusion (S-matrix) sous les lois de la physique vers un pur état final entièrement composé de configurations régulières de champ sur des hypersurfaces asymptotiquement plates.

Stephen Hawking parie avec Don Page un dollar US que, dans la gravité quantique, l'évolution d'un tel pur état initial peut être donné en général, vers un état final mitigé, seulement par une matrice-dollar (\$-matrix) et pas toujours vers un pur état final par une matrice de diffusion.

Signatures manuscrites de Don Page
et Stephen Hawking

« Je m'avoue vaincu à la lumière de la faiblesse
du \$ »

Stephen Hawking, 23 avril 2007

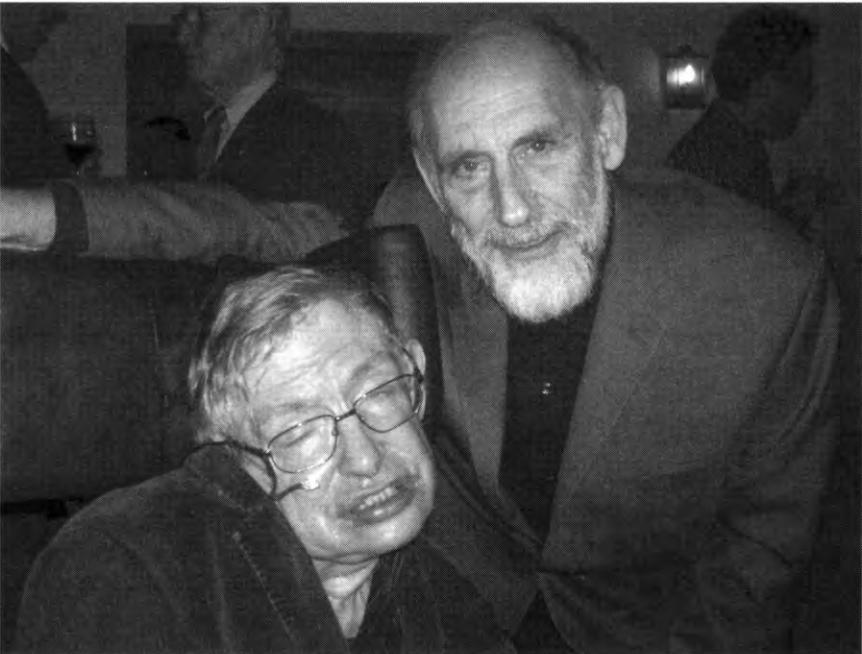
Qu'y avait-il dans la conférence de Stephen ? Je ne sais pas : je n'y étais pas. Mais un article écrit plusieurs mois plus tard donna les détails. Il n'y en avait pas beaucoup : une brève histoire du paradoxe, une description verbeuse de quelques arguments de Maldacena et une explication finale tortueuse sur la manière dont tout le monde avait eu raison tout du long.

Mais tout le monde n'a pas eu raison.

Ces dernières années, nous avons vu quelques arguments remarquablement chicaneurs déguisés en débats scientifiques alors qu'il ne s'agit que de querelles politiques. Cela englobe les controverses sur le dessein intelligent ; la question du réchauffement climatique et, s'il est avéré, du fait que c'est l'Homme qui en est responsable ; l'intérêt de coûteux systèmes de boucliers antimissile ; et même la théorie des cordes. Mais, heureusement, tous les débats scientifiques ne sont pas polémiques. De temps à autre, de véritables différences d'opinion sur des questions substantielles se produisent et conduisent à de nouvelles idées ou même des changements de paradigme. La guerre du trou noir est un exemple de débat qui n'a jamais été polémique. Il mettait en jeu d'authentiques désaccords sur le choc des principes scientifiques. Bien que la question de savoir si l'information se perd dans les trous noirs ait été certainement, au début, une question de conviction, l'opinion scientifique s'est aujourd'hui largement unie en un nouveau paradigme. Mais, bien que la guerre d'origine soit finie, je doute que nous en ayons tiré toutes les leçons importantes. La lacune la plus troublante de la théorie des cordes est comment l'appliquer à l'univers réel. Le principe holographique a été spectaculairement confirmé par la théorie de Maldacena de l'espace anti de Sitter mais ce n'est pas là la géométrie de l'univers réel. Nous vivons dans un univers en expansion qui, s'il est quelque chose, ressemble davantage à un espace de De Sitter, avec ses horizons cosmiques et ses univers-bulles de poche. Pour le moment, personne ne sait comment appliquer la théorie des cordes, le principe holographique et autres leçons apprises des horizons des trous noirs aux horizons cosmiques mais les liens sont probablement très profonds. Ma propre hypothèse est que ces liens sont à la racine de bien des mystères cosmologiques. J'espère un jour écrire un autre livre expliquant comment tout cela se joue en fin de compte, mais je crains que ce ne soit pas pour bientôt.



Claudio Teitelboim (Bunster), Gerard 't Hooft, l'auteur, John Wheeler et François Englert, Valparaiso, 1994



Stephen et l'auteur, Valdivia, Chili, 2008

Remerciements

Je suis très reconnaissant envers de nombreuses personnes qui m'ont aidé à achever ce livre. Envers mon agent, John Brockman, qui, comme toujours, m'a fait profiter de ses conseils avisés. Envers tous ceux de Little, Brown qui ont travaillé avec ardeur – Geoff Shandler, la travailleuse en freelance Barbara Jatkola, Karen Landry et Junie Dahn – et à qui je voudrais exprimer mes profonds remerciements.

Je suis extrêmement redevable à Stephen Hawking et Gerard 't Hooft pour de nombreuses années d'amitié et pour l'expérience extraordinaire et exaltante qui a rendu ce livre possible.

Glossaire

Antipodes : Côté de la Terre diamétralement opposé à un autre.

Bit : unité de base d'information (acronyme de Binary digIT, élément discret binaire).

Champ électrique : champ de forces qui entoure les charges électriques.

Champ magnétique : champ de forces qui entoure les aimants et les courants électriques.

Chromodynamique quantique : théorie quantique des champs qui décrit les quarks et les gluons, ainsi que la façon dont ils forment les hadrons.

Complémentarité du trou noir : principe de complémentarité de Bohr appliqué aux trous noirs.

Constante de Newton : constante numérique G de la loi de Newton sur les forces gravitationnelles. $G = 6,7 \times 10^{-11}$ dans le système métrique.

Constante de Planck : La constante numérique h qui gouverne les phénomènes quantiques.

Corde fermée : corde sans extrémités, semblable à un élastique.

Cordes fondamentales : cordes qui forment les gravitons. On pense que la taille caractéristique de ces cordes n'est pas beaucoup plus grande que la longueur de Planck.

Corde ouverte : corde avec deux extrémités. Un élastique est une corde fermée mais, si on le coupe avec des ciseaux, il devient une corde ouverte.

Cordes QCD : cordes faites de gluons qui relient les quarks entre eux pour former les hadrons.

Corpuscules : terme utilisé par Newton pour les particules hypothétiques de lumière.

Courbure : déformation de l'espace ou de l'espace-temps.

D-brane : surface de l'espace-temps sur laquelle une corde fondamentale peut être attachée par une extrémité.

Déterminisme : principe de la physique classique qui dit que le futur est entièrement déterminé par le présent. Sapé par la mécanique quantique.

Deuxième loi de la thermodynamique : l'entropie augmente toujours.

Diagramme de plongement : représentation de l'espace-temps à un instant donné obtenue en coupant en « tranches » le continuum d'espace-temps.

Dualité : relation entre deux descriptions du même système apparemment différentes.

Effet tunnel : phénomène quantique dans lequel une particule traverse une barrière quand bien même elle n'a pas l'énergie pour le faire de façon classique.

Entropie : mesure de l'information cachée – souvent l'information stockée dans des objets trop petits et nombreux pour qu'on puisse en conserver la connaissance.

Espace anti de Sitter : continuum d'espace-temps avec une courbure négative qui ressemble à une boîte sphérique.

Espace-temps : tout l'espace et le temps unifiés en une unique variété quadridimensionnelle.

Étoile à neutrons : stade final d'une étoile trop grosse pour former une naine blanche mais pas assez pour s'effondrer en un trou noir.

Étoile sombre : étoile si lourde et si dense que la lumière ne peut pas s'en échapper. Appelée aujourd'hui un *trou noir*.

État fondamental : état d'un système quantique qui a le moins d'énergie possible. Souvent identifié à l'état au zéro absolu.

Événement : point de l'espace-temps.

Forces de marée : forces déformantes dues aux variations dans l'espace de l'intensité de la gravité.

Géodésique : ce qui se rapproche le plus d'une ligne droite dans un espace courbe. Le plus court chemin entre deux points.

Glueball : hadron seulement composé de gluons, sans quark. Les glueballs sont des cordes fermées.

Gluons : particules qui se combinent pour former les cordes liant les quarks.

Gnoquer : comprendre quelque chose de façon profonde et intuitive, à un niveau « tripal ».

Gravité quantique : théorie qui unifie la mécanique quantique avec la relativité générale d'Einstein ; la théorie quantique de la gravité. Aujourd'hui, une théorie incomplète.

Hadrons : particules étroitement liées au noyau : nucléons, mésons et glueballs. Les hadrons sont faits de quarks et de gluons.

Hertz : unité de fréquence qui mesure le nombre d'oscillations complètes par seconde.

Hologramme : représentation bidimensionnelle d'une information tridimensionnelle. Un genre de photographie à partir de laquelle une image tridimensionnelle peut être reconstituée.

Horizon : surface à l'intérieur de laquelle rien ne peut échapper à la singularité d'un trou noir.

Information : données qui distinguent un état de choses d'un autre. Mesurée en bits.

Interférence : phénomène ondulatoire dans lequel les ondes provenant de deux sources différentes s'annulent ou se renforcent en certains endroits.

IR : infrarouge. Souvent utilisé pour indiquer de grandes distances.

Ligne d'univers : trajectoire d'une particule dans l'espace-temps.

Longueur de Planck : unité de longueur quand les trois constantes fondamentales de la nature – c , h et G – sont fixées à 1. Souvent vue comme la plus petite longueur ayant un sens : 10^{-33} centimètre.

Longueur d'onde : distance occupée par une onde complète d'une crête à l'autre.

Masse de Planck : unité de masse en unités de Planck : 10^{-8} kilogramme.

Matrice de diffusion : description mathématique de la collision entre des particules. Il s'agit d'une liste de toutes les entrées possibles et des amplitudes de probabilité pour toutes les sorties. En anglais, S-matrix.

Matrice-dollar : tentative de Hawking pour remplacer la matrice de diffusion. En anglais \$-matrix, matrice « non » S, d'où le matrice-dollar.

Micro-ondes : ondes électromagnétiques dont la longueur d'onde est un peu plus petite que celle des ondes radio.

Mouvement au point zéro : mouvement résiduel d'un système quantique. Il ne peut jamais être éliminé à cause du principe d'incertitude. Aussi appelé *soubresauts quantiques*.

Mouvement brownien : mouvement aléatoire d'un grain de pollen en suspension dans l'eau. Causé par le bombardement constant par les molécules d'eau excitées par la chaleur.

Naine blanche : dernier stade d'une étoile pas beaucoup plus grosse que le Soleil.

Nucléon : proton ou neutron.

Ondes électromagnétiques : perturbations de l'espace semblables à des ondes et consistant en vibrations des champs électrique et magnétique. La lumière est une onde électromagnétique.

Ondes radio : la plus grande des longueurs d'ondes des ondes électromagnétiques.

Oscillateur : tout système qui subit des vibrations périodiques.

Photons : quanta (particules) indivisibles de lumière.

Physique classique : physique qui ne tient pas compte de la mécanique quantique. Se réfère généralement à la physique déterministe.

Point de non-retour : analogue de l'horizon d'un trou noir.

Première loi de la thermodynamique : loi de la conservation de l'énergie.

Principe de non-photocopie quantique : théorème de mécanique quantique qui exclut la possibilité qu'existe une machine qui pourrait parfaitement copier l'information quantique. Aussi appelé principe de non-clonage.

Principe d'équivalence : principe d'Einstein disant que la gravitation ne peut être distinguée de l'accélération – par exemple dans un ascenseur.

Principe d'incertitude de Heisenberg : principe de la mécanique quantique qui limite notre aptitude à déterminer simultanément position et vitesse.

Principe holographique : principe qui dit que toutes les informations se trouvent sur le bord d'une portion de l'espace.

QCD : chromodynamique quantique.

Rayon de Schwarzschild : rayon de l'horizon d'un trou noir.

Rayons gamma : ondes électromagnétiques possédant la plus courte longueur d'onde ; les plus énergétiques.

Rayons X : ondes électromagnétiques de longueur d'onde un peu plus petite que celle du rayonnement ultraviolet mais pas aussi petite que celle des rayons gamma.

Rayonnement de corps noir : rayonnement électromagnétique émis par un corps non réfléchissant et dû à sa propre chaleur.

Rayonnement de Hawking : rayonnement de corps noir émis par un trou noir.

Rayonnement infrarouge : ondes électromagnétiques dont la longueur d'onde est un peu plus grande que celle de la lumière visible.

Rayonnement ultraviolet : ondes électromagnétiques dont la longueur d'onde est un peu plus petite que celle de la lumière visible.

RHIC : collisionneur relativiste d'ions lourds. Un accélérateur qui conduit des noyaux lourds à des vitesses proches de celle de la lumière et les fait entrer en collision pour créer une giclée de matériau nucléaire très chaud.

Simultanéité : se réfère à des événements ayant lieu au même instant. Depuis la théorie de la relativité restreinte, n'est plus considérée comme une propriété objective.

Singularité : point infiniment dense au centre d'un trou noir et où les forces de marée deviennent infinies.

Température : augmentation de l'énergie d'un système quand un bit d'entropie est ajouté.

Température de Hawking : température d'un trou noir vu à distance.

Temps de Planck : unité de temps en unités de Planck : 10^{-42} seconde.

Temps propre : temps écoulé mesuré par une montre en mouvement ; une mesure de la distance le long d'une ligne d'univers.

Théorie de la relativité générale : théorie d'Einstein de la gravité basée sur un espace-temps courbe.

Théorie de la relativité restreinte : théorie d'Einstein de 1905 qui s'occupe des paradoxes de la vitesse de la lumière. La théorie dit que le temps est la quatrième dimension.

Théorie des cordes : théorie mathématique dans laquelle les particules élémentaires sont vues comme de microscopiques et unidimensionnelles cordes d'énergie. Une candidate pour la gravité quantique.

Théorie du bord : théorie mathématique sur le bord d'une portion de l'espace qui décrit tout ce qu'il y a dedans.

Théorie quantique des champs : théorie mathématique qui unifie les caractéristiques corpusculaire et ondulatoire de la matière. La base de la physique des particules élémentaires.

Trou noir : objet si massif et dense que rien ne peut échapper à sa gravité.

Trou noir extrémal : trou noir chargé électriquement qui a atteint sa masse la plus petite pour une charge donnée.

Trous silencieux : drain près duquel la vitesse d'écoulement dépasse la vitesse du son (dans l'eau).

UV : ultraviolet. Souvent utilisé pour indiquer de très petites distances.

Viscosité : frottement entre les couches d'un fluide quand elles se déplacent les unes par rapport aux autres.

Vitesse de la lumière : vitesse à laquelle se déplace la lumière. Approximativement 300 000 kilomètres par seconde.

Vitesse de libération : vitesse minimale nécessaire pour qu'un projectile échappe à l'attraction gravitationnelle d'un objet massif.

Index

A

Abbott, Edwin : 234, 338
accélérateurs : 197, 259, 335, 358, 366, 450
accélération : 11, 36, 42-44, 48, 67-68, 75, 205, 208-209, 219-221, 276, 346, 434, 449
Akiba, Rabbi : 159
Allen, Woody : 75
Allende, Salvador : 146, 392
Amati, Daniele : 392
antimatière : 311-312, 395
Aristote : 202, 262
Aspen, Institut de physique théorique d' : 225
astronomie : 29, 114, 159, 200, 202, 431
atome : 17, 45, 86, 99-100, 123, 134, 138, 142, 145, 152, 155, 238, 247, 256-259, 266, 268, 275, 292, 299, 311-312, 314, 319, 329, 333, 352, 357, 384, 423
Avogadro, nombre d' : 114

B

Bañados, Max : 394, 396-397, 402
Banks, Tom : 27, 187, 378-379, 408
Bardeen, James : 121
Barrow, John : 160
baryon : 321
behaviorisme : 433

Bekenstein, Jacob : 49, 143-144, 148-153, 155-156, 167, 169-170, 173, 248, 308, 356, 365, 391, 427, 435
Berra, Yogi : 74
bibliothèque, analogie de la : 135, 137, 139-140, 156, 294, 297, 333
bit d'information : 14, 131, 133, 138, 140, 152-155, 169, 183, 186, 188-190, 220, 227, 237, 239, 259-260, 263, 293-294, 299, 333, 369, 447, 450
Bohr, Niels : 23, 83, 85, 91, 144, 158, 242-243, 247, 253, 259, 423, 447
Boltzmann, Ludwig : 161, 163, 169, 202-203, 208
Bolyai, Janós : 53
Born, Max : 85
brane : 385-388, 408, 410-411, 423
 brane IR : 421-423, 425
 brane UV : 421-425
 D-brane : 385-387, 408-412, 416, 447
Brockman, John : 110, 445
Bunster, Claudio (Claudio Teitelboim) : 144, 146, 223, 392-394, 396-397, 402, 407, 443

C

California Institute of Technologie (CalTech) : 256
Callan, Curt : 234, 388-390

Candelas, Philip : 160
 Carnot, Nicolas Léonard Sadi : 168-169, 201
 Carroll, Lewis : 79
 Carter, Brandon : 121, 160
 Cavendish, Henry : 51
 chaleur : 27, 33, 98-100, 116-117, 121, 127-130, 141-144, 157, 159, 161-163, 165, 168-169, 171-172, 185-187, 200, 207, 217-218, 308, 370, 373, 388, 449-450
 chromodynamique quantique (QCD) : 318, 322-325, 334, 411-412, 416, 420-421, 426, 447, 450
 Chu, Steve : 216
 Churchill, Winston : 19
 code binaire : 132
 Coleman, Sydney : 22, 225-226, 228, 256
 compact, compactifier, compactification : 139, 337, 341, 343
 complémentarité : 237, 242-244, 251, 253, 256-257, 259, 261, 347, 428, 434, 447
 du trou noir : 259-260, 263, 269, 282, 286, 289, 304, 309-310, 351-352, 356, 379, 417, 427, 447
 Compton, Arthur : 308
 condensat : 347-349
 conservation de l'énergie : 89, 91, 130, 142-143, 271, 449
 constante : 42, 50, 67-68, 84, 97, 99, 104, 113-115, 128, 153, 161, 169, 377, 394, 430-431, 447
 de Newton : 50, 113, 115, 161, 447
 de Planck : 84, 97, 99, 104, 113-115, 153, 161, 447
 continuum d'espace-temps : 330, 332-333, 394, 397, 400, 414, 448
 contradictions : 13, 15, 75, 149, 201, 203, 209, 222, 236, 240-244, 247, 252, 254-255, 259-260
 corps noir : 164-165, 171, 173, 185, 206, 450
 cosmologie : 159, 213, 435, 438
 Crick, Francis H. C. : 277
 Crosby, Bing : 287

D

Dante : 40-41
 Darwin, Charles : 262, 276-277, 281
 Das, Sumit : 390
 Dawkins, Richard : 278
 déterminisme : 14, 86-87, 105, 262, 428-429, 447
 Deutsch, David : 160
 DeWitt, Bryce : 13
 diagramme de plongement : 71-74, 397, 448
 dimension : 11-12, 36, 53-54, 56, 59, 66, 70-71, 78, 115, 136-138, 141, 234, 265-266, 290, 294-296, 303, 310, 336-343, 358, 372, 381, 383, 385-387, 394-397, 402, 404-405, 407-408, 411-413, 420-422, 425, 428, 438
 Dimopoulos, Savas : 22
 Dirac, Paul : 109, 170, 208, 227, 290, 386
 Dirichlet, Johann : 385
 Douglas, Michael : 379
 drain, analogie (têtards) : 45-46, 72, 190, 197, 353, 451
 dualité : 386, 412-413, 425, 448
 Dyson, Freeman : 13, 210

E

effet tunnel : 123-125, 448
 Einstein, Albert : 11-13, 23, 28, 34, 36, 41-44, 50, 58-59, 63-69, 72-73, 76-77, 79, 82-86, 88-89, 91, 94-95, 104, 109-112, 116, 123, 129, 144-145, 147, 149, 153, 156, 163-164, 166, 168, 170, 190, 192, 203, 205-206, 208, 210, 226-227, 242, 244, 262, 265-266, 289, 308, 327, 337, 344-345, 347, 383-384, 388, 394, 430-431, 448-450, 463
 élastique, analogie de l' : 69-71, 262, 292, 316-317, 319, 325, 334, 344, 352, 370, 382-383, 447
 électron : 11, 17-18, 34, 42, 77, 80, 97, 100, 106-107, 109, 113-114, 117, 124-125, 129, 145, 161, 181,

193-196, 210, 213-214, 228, 243-244, 246-247, 257-258, 266, 276, 292, 311-314, 318-321, 327, 330-331, 334-335, 344, 346-347, 357-359, 366-367, 379-380, 384, 427

Ellis, George : 49

En terre étrangère (Heinlein) : 9, 11

Englert, François (photo) : 443

entropie : 15, 27, 118, 121, 127-128, 130, 133-135, 141-144, 149-151, 155-156, 161, 168-171, 173, 186-187, 190, 199, 203, 238, 251-252, 294, 302, 308, 351, 365, 368-372, 374-375, 379-381, 384, 387-391, 416-417, 426, 435, 438, 447-448, 450, 463

Erhard, Ludwig : 21

Erhard, Werner : 21, 179, 182, 209

Escher, M. C. : 399-401, 403-404, 421

espace

- anti de Sitter (AdS) : 394-397, 399-405, 408, 412-414, 416, 420-421, 442, 448
- bord de : 298-299, 414, 429
- diagramme de Feynman d'espace-temps : 172
- dimensions de : 11-12, 36, 53-54, 56, 59, 66, 70-71, 78, 115, 136-138, 141, 234, 265-266, 290, 294-296, 303, 310, 336-343, 358, 372, 381, 383, 385-387, 394-397, 402, 404-405, 407-408, 411-413, 420-422, 425, 428, 438
- dimensions supplémentaires : 337-338, 340-341, 343, 381, 387, 413

espace-temps : 11-12, 15, 58-61, 63-64, 66-71, 73, 76-77, 105, 175, 183, 187, 262, 323, 329-330, 332-333, 345, 349, 394-397, 399-401, 414, 428, 430, 435, 447-450

éther luminifère : 170

Euclide : 54

évolution : 10-11, 15, 87, 162, 199, 241, 244, 254, 276-277, 281, 291, 441

F

Faraday, Michael : 344-347

Feynman, Richard « Dick » : 13, 22-23, 85-86, 97, 107, 109, 119-123, 125-127, 140, 144, 167, 172, 185, 191, 212, 256, 316, 328, 330-333, 344-347, 375, 389

Finkelstein, David : 22, 120

Fischler, Willy : 223, 393, 408

Fitzgerald, Barry : 287

Flatland, une aventure à plusieurs dimensions (Abbott) : 234

fluctuations (soubresauts) quantiques : 98-100, 124, 147, 170-173, 185, 187, 292, 303, 347, 353, 356, 362, 370, 375, 384, 387, 449

fluctuations (soubresauts) thermiques : 99-100, 170-172, 186, 353, 356

fluctuations du vide : 170, 173

force : 10-11, 23-24, 30-32, 36-40, 44, 50-51, 67-69, 86, 88, 115, 145, 161, 175, 205, 213-215, 220, 249, 264, 271, 286, 288, 291, 312-313, 315, 325-326, 344-350, 372, 375, 380, 388, 395, 411-412, 430-431, 447-448, 450

formule d'Einstein-Planck : 153

Fradkin, Eduardo : 392

fréquence : 47-48, 81-82, 84, 102-105, 153, 208, 347, 353-354, 357, 359-360, 427, 448

G

Gabor, Dennis : 296

Galilée : 43, 202-203, 206, 210

Gauss, Carl Friedrich : 53

Gell-Mann, Murray : 22, 123, 256, 316, 337

géodésique : 57, 68, 448

géométrie : 12, 53-56, 58-59, 66, 69, 71, 76-77, 147, 183, 190, 332, 345, 348, 383, 442, 463

géométrie quantique : 147

Gibbons, Gary : 271

Giddings, Steve : 216, 234-235, 248, 255, 271

Glashow, Sheldon : 22

glueball : 310, 313, 317, 319-320, 325, 334, 349, 412, 416, 418-419, 423, 448

gluon : 107-108, 119, 316, 318-320, 322-325, 411, 414, 418, 420, 426, 447-448

googol : 18

goutte d'encre, analogie de la : 269

gravité : 12-15, 29, 31-33, 40-44, 49-50, 67-70, 76-77, 84, 91, 93, 121-122, 126, 128, 144-145, 148, 155, 159, 161, 168, 191-193, 202, 208-209, 212-215, 219-223, 235, 249, 260, 262, 276, 299-300, 304, 309-310, 325-326, 332, 345, 350-351, 369, 372-375, 380, 383, 388, 402, 412, 414, 417, 419, 421, 423, 427-430, 435, 441, 448-450

quantique : 14-15, 121, 144, 155, 161, 212, 214-215, 235, 249, 260, 300, 304, 310, 325, 351, 417, 419, 421, 423, 427-429, 435, 441, 448, 450

graviton : 136, 325, 327-328, 332-334, 346-347, 349, 366, 378, 419-420, 423, 425, 447

Greene, Brian : 99, 210, 310

H

hadron : 310, 313, 316-317, 320-321, 325, 335, 418-420, 423, 426, 447-448

Halley, Sir Edmond : 160

Hamlet (Shakespeare) : 29

Hartle, James : 235

Harvey, Jeff : 234, 271, 284, 415-416

hasard : 87-89, 91-92, 100, 105, 108, 129-130, 140, 151, 154, 171, 181, 197, 203, 242, 251

Hawking, Stephen : 7, 14-15, 22-23, 25, 27, 49, 93-94, 121, 143, 150, 156, 160, 164, 166-168, 170, 173-175, 184-185, 187, 189-191, 193-194, 197, 199-201, 209, 212-213, 216, 221-223, 225-227, 234-237, 239, 242, 248, 250-253, 255, 259-261, 263, 267, 269-271, 282, 308-310, 337, 350, 356, 362, 365, 378,

384, 387-388, 390-391, 393, 402, 415, 417, 427-429, 434-435, 437-438, 441, 445, 449-450

Heinlein, Robert A. : 9, 11

Heisenberg, Werner : 11, 21, 94, 97, 109, 152, 208, 210, 227-228, 242, 244, 246-247, 256, 258-259, 268, 290, 449

Hertz, Heinrich : 47

Hilbert, espaces de : 78, 428

Hoban, Russel : 361

Holmes, Sherlock : 179, 253

hologramme : 14, 156, 240, 289, 293, 296-298, 300, 302-304, 307, 406, 413, 415-416, 448, 464

horizon

cosmique : 432, 434-435, 442

d'un trou noir : 40, 48, 76-77, 93, 118, 120-121, 148, 150, 164, 172-173, 183, 192, 222, 227, 251, 254, 356, 377, 379, 383, 415, 426, 434, 449-450

Horowitz, Gary : 235, 248, 255, 263, 271, 284, 286, 289, 391

Huxley, Thomas : 277, 282

I-J-K

imprédictibilité/prédictibilité : 85, 88

information

bit d' : 138, 140, 152-155, 186, 188-190, 220, 227, 237, 239, 259, 263, 293, 299, 369

conservation d' : 14-15, 89-91, 93, 179, 197, 435

paradoxe d' : 185, 189, 236, 248, 428

perte d' : 27, 93, 187, 209, 212, 226, 234, 261, 285, 289, 350, 365, 390, 438

informatique quantique : 160

infrarouge : 48, 165, 207, 268, 421-422, 449-450

Innes, révérend John : 277

Israel, Werner : 148

jonglerie, analogie de la : 204-205, 346

joules : 117
Joyce, James : 321

Klein, Felix : 337, 341
Kovtun, Pavel : 427
Kuhn, Thomas : 262, 427
Kurosawa, Akira : 237

L

La Leçon d'anatomie (Rembrandt) : 294

La Magie du Cosmos (Greene) : 210
La Quête du roi Arthur (White) : 123
La Structure des révolutions scientifiques (Kuhn) : 262

Laplace, Pierre Simon de : 29, 31-32, 41, 44, 52, 86, 88, 94, 105, 108-109, 153, 164, 203

Le Déjeuner des canotiers (Renoir) : 329

Le Guide des égarés (Maimonide) : 159

Le Paysage cosmique (Susskind) : 278, 310, 431

Le Trou noir (le film) : 72

Lee, T. D. : 120, 122, 271

lepton : 321, 366

Les Aventures d'Alice au pays des merveilles : 79

Les Faux Durs (film de Michael Ritchie) : 22

Lewis, Gilbert : 12, 79

ligne d'univers : 60-69, 76-77, 105-106, 172, 323, 449-450

Limite circulaire IV : 399, 403

Lineland : 338-339, 382, 395, 397

Lobatchevski, Nicolai : 53

logarithme : 133

logique quantique : 13, 93, 109, 428

loi de Hubble : 431

lois de la nature : 14-15, 85-86, 89, 115, 118, 148, 202, 206, 277, 367

longueur d'onde : 81-82, 84-85, 152-153, 207, 221, 245-247, 258, 265, 267-269, 421, 449-450

longueur de Planck : 115-116, 154-155, 186, 214-215, 238, 259, 267,

292, 298, 333-334, 352, 361, 427, 447, 449

lumière : 11-12, 17, 29, 31-34, 41-45, 48, 50, 52, 61, 63, 73, 79-84, 94, 100, 102, 104, 106, 113-117, 125, 148, 153-154, 161, 163-165, 170, 183, 190-191, 194, 203, 205-208, 213, 220-222, 242-244, 246, 258, 266, 278, 289, 294, 296-298, 302, 308, 321, 326, 330, 339, 346-347, 353, 358, 366, 412, 418, 421, 429, 432, 441, 447-451

M

Maimonide : 159

Maldacena, Juan : 388-390, 407-408, 412-416, 420-421, 430, 438, 442

Mandal, Gautam : 390

Mandela, Nelson : 285

marée et forces de marée : 36, 38-40, 44, 448, 450

masse : 11, 15, 18, 30-36, 40, 43, 49-52, 68-69, 71, 76, 97, 115-117, 127, 129, 139, 148-150, 153-154, 161-162, 165-166, 168, 174, 186, 193, 200-201, 238, 252, 263, 266-268, 276, 301-302, 307, 311-313, 317, 327, 335, 339, 358, 366-375, 380, 382-383, 401-403, 417, 420, 429, 449-450

Mathur, Samir : 390

matière : 12-13, 25, 34, 41, 48, 116, 136, 138, 163, 167, 202, 214, 220, 238-239, 241, 256, 276, 294, 301, 312, 321, 329, 334, 346, 373, 385, 412, 414, 418, 450

matrice de diffusion (S-matrix) : 192, 194-199, 212, 408, 441, 449

matrice-dollar (\$-matrix) : 197, 212, 271, 441, 449

Maxwell, James Clerk : 41, 80-81, 94, 163, 170, 181, 203, 205-206, 208, 344-347

mécanique quantique : 11-15, 27, 77-78, 80, 85, 88, 91, 93-94, 99-100, 102, 104-106, 111, 118, 121-123, 125, 144, 147-148, 155, 158, 161-163, 170-171, 181-182, 185, 188,

198, 209-210, 213-214, 219-220, 222, 227-228, 234, 242-243, 262, 281, 289, 299-300, 303, 309, 313, 330, 332, 334, 336, 346, 350-351, 374, 377, 390, 396, 415, 428-430, 447-449
 Melville, Hermann : 270, 435
 méson : 119, 310, 313, 316-317, 319-322, 325, 334, 412, 418-419, 427, 448
 Michell, John : 29, 31-32, 41, 44, 52, 164
 Michelson, Albert : 11
 micro-onde : 48, 82, 99, 207, 245, 449
 Minkowski, Hermann : 59-63, 66, 68-69
 Misner, Charles : 144
 moment cinétique : 168, 312-313, 315
 Morley, Edward : 11
 morpion, analogie du jeu de : 138
 mouche, analogie de la (dans un film d'horreur) : 225, 419
 mouvement au point zéro (soubresauts quantiques) : 99, 292, 348, 449

N-O

naine blanche : 33-34, 71, 448-449
 Neruda, Pablo : 392
 neutrino : 136, 138, 144, 195, 366, 427
 neutron : 17, 34, 71, 119, 124, 195, 266, 276, 310, 312-314, 359, 418, 448-449
 Newton Institute (Cambridge) : 271, 274-275, 282-283, 285, 287
 Newton, Isaac : 29, 41, 50-51, 62-63, 66-68, 80, 84, 86, 105, 154, 160, 181, 202-203, 206, 262, 271-272, 274-276, 282-283, 285, 287, 325, 344, 351, 423, 447
 nombres : 16-18, 85, 109, 111, 113-114, 140, 154-155, 161, 174, 329, 412, 420
 notation scientifique : 16, 18
 noyau en rotation : 314

nucléon : 17, 311, 314-317, 319-320, 322, 325, 417-419, 427, 448-449
 nucléon en rotation : 315

ondes

électromagnétiques : 41, 80, 102, 105, 207, 326-327, 449-450
 gravitationnelles : 123, 326-327
 radio : 48, 82, 99, 221, 245, 247, 449
 oscillation : 47, 81-82, 102, 104, 353, 360, 422, 448

P

Page, Don : 252, 255, 260, 263, 286, 402, 439, 441
 paradoxe des jumeaux : 66, 77
 particule : 12, 14, 17-18, 23, 29, 41, 44-45, 60-61, 64, 66-69, 72, 79-80, 82, 84, 86, 91, 94-99, 102, 105-109, 115, 119, 124-125, 127, 136, 138-139, 144-145, 147, 152, 166, 173, 175, 185-186, 189, 191, 193-195, 197-198, 200, 203, 208, 211-215, 222, 234, 242-244, 256, 258-259, 261, 266-267, 292-293, 299, 307-312, 314-315, 317-318, 320-323, 325-327, 332-335, 338, 343-347, 352-353, 357-360, 362, 366-370, 378, 382, 385-386, 394, 397, 402, 408, 411-412, 414, 418-419, 422-423, 426-427, 429, 447-450
 collision : 194, 196
 Pauli, Wolfgang : 337
 Peet, Amanda : 233, 381
 Penrose, Sir Roger : 26, 160, 166, 183, 271, 329, 438
 Peskin, Michael : 27, 187
 Petersen, Aage : 158
 phlogistique : 129
 photon : 12, 17, 82-85, 91-93, 99-102, 105-107, 109, 125, 129, 136, 152-153, 161, 163, 165, 170-173, 181-182, 189-190, 193-196, 198, 200, 208, 214-215, 218, 220-222, 243-244, 247, 258-259, 261, 263, 265-267, 269, 292, 300, 311, 321, 327,

331, 334-335, 345-347, 366, 369, 378, 403, 427, 429, 434, 449
Physical Review : 111, 148
 physique
 classique : 94, 103, 105, 123, 180-182, 207, 256, 384, 447, 449
 nucléaire : 115, 310, 314, 321, 349, 385, 417-420, 423, 426-427, 464
 physique quantique : 94, 123, 264
 Pinochet, Augusto : 146, 392-393
 pixels : 151, 251, 294-298, 300, 302-303, 406
 Planck, Max : 82, 84, 115, 138, 208
 Podolsky, Boris : 111
 point de non-retour : 46-49, 120, 156, 183, 190, 197, 212, 219, 221, 227, 240, 256, 432, 434, 449
 point limite : 333
 Polchinski, Joe : 223, 236, 248, 255-256, 260, 263, 385-386, 390-391, 408
 Polkinghorne, John : 272-273, 275, 277-278
 positron : 125, 311-312, 358
 prédictibilité/imprédictibilité : 85, 88
 Preskill, John : 255-256, 258-260, 263, 439
 principe anthropique : 160
 principe d'équipartition : 207
 principe d'équivalence : 28, 43, 45, 156, 209, 219-220, 222, 252, 255-256, 449
 principe d'incertitude : 11, 94-98, 228, 242, 259, 292, 384, 449
 principe de non-clonage : 227, 449
 principe de non-photocopie quantique : 227-228, 260, 449
 principe de relativité : 203, 205-206
 principe holographique : 297-298, 300, 302-304, 307, 309-310, 333, 351, 384, 406, 408, 413-414, 417, 420-421, 427, 429, 438, 442, 449
 probabilité : 88, 95, 108-111, 123, 130, 181, 194-196, 252, 277, 322, 331, 377, 449
 propagateur : 106-107, 323, 330-331
 proton : 15, 17, 34, 41, 113-115, 119, 124, 127, 154, 194, 196, 213, 247, 257-258, 266, 276, 311, 313-314,

325, 335, 350, 358-359, 368, 384, 412, 417-418, 427, 429, 449
 Ptolémée II, pharaon d'Égypte : 137, 140-141, 156, 294, 297, 333

Q-R

Q-espace : 421-422
 quantum d'énergie : 104-105
 quark : 108, 115, 119, 127, 138, 144, 213-214, 257, 266, 311-312, 316-323, 325, 358-359, 366-367, 418, 420, 426-427, 447-448
 Rabi, I. I. : 119
 Rand, Ayn : 233
 Randall, Lisa : 310, 421
Rashomon (film de Kurosawa) : 237
 rayonnement de corps noir, voir photon : 200, 207, 434, 450
 rayonnement électromagnétique : 82, 162, 165, 244, 327
 rayons
 gamma : 82, 85, 207, 221, 450
 X : 82, 207, 308, 346, 450
 Reagan, Ronald : 18, 233
 réductionnisme : 268, 311, 325
 Rees, Sir Martin : 160
 Regge, Tullio : 313
 Rembrandt : 294
 Renoir, Pierre-Auguste : 329
 réseau cristallin, analogie du : 130
 Reynolds, Burt : 22
 Riazuelo, Alain : 35
 Riemann, Georg Friedrich Bernhard : 53, 58, 66
 Rocek, Martin : 24
 Rømer, Ole : 31
 Rosen, Nathan : 72-73, 111
 Rosenberg, Jack, voir Werner Erhard
 Rubinstein, Hector : 392
 Russo, Jorge : 234
 Rutherford, Ernest : 274, 311

S

Sagan, Carl : 132
 Schrödinger, Erwin : 94, 109, 208

Schwarzschild, Karl : 35, 42, 148
 rayon de : 35, 40, 48, 72, 368, 371-372
 Schwinger, Julian : 13
 Sciamia, Dennis : 158-162, 164-167, 173
 Seiberg, Nathan « Nati » : 378-379
 Sen, Ashoke : 381-384, 389-390
 Shakespeare, William : 29
 Shenker, Steve : 216, 378-379, 408
 simultanéité : 14, 77, 206, 428-429, 450
 singularité : 26, 34, 36, 41, 48-49, 72-73, 120, 183, 219, 222, 226, 234, 240, 260, 263, 379, 402, 448, 450
 Sirlin, Alberto : 392
 Sitter, Willem, de : 394
 Smith, Joseph : 280-281
 Son, Dam : 21, 26, 35-36, 148, 186, 216, 218-219, 226, 242, 249, 275, 283-284, 339, 382, 427
 Soodack, Harry : 146-147
Souris, père et fils (Hoban) : 361, 399
 Starinets, Andrei : 427
 Strominger, Andy : 234-235, 248, 255, 263, 271, 286, 387-388, 390, 438
 superpartenaires (particules hypothétiques) : 366-367
 Susskind, Leonard : 23, 179, 224, 234, 260-261, 310, 321

T

Teitelboim, Claudio : 144, 146, 223, 392, 407
 température d'un trou noir : 162, 164, 169, 173-174, 308, 450
 temps
 de Planck : 116, 293, 358-359, 450
 dilatation du : 64, 400
 propre : 62-64, 66-67, 76, 450
 vu comme quatrième dimension : 59, 450
 têtards, analogie des : 45-46, 48, 72, 183, 221, 432
 théorème adiabatique : 374
 théorie de la relativité générale : 12-13, 27, 42, 45, 50, 58, 70, 73, 76-

77, 118, 121-122, 147-148, 155, 166, 185, 187, 191, 208, 210, 222, 235, 271, 289, 332, 351-352, 383, 391, 400, 430, 448, 450
 théorie de la relativité restreinte : 11-13, 41, 59, 63, 161, 163, 206, 326, 396, 429, 450
 théorie des partons : 119-120, 122, 127, 316
 théorie du bord : 415, 450
 théorie quantique des champs : 105, 108-110, 122, 167, 170, 172-173, 252, 309, 323, 327-329, 332-333, 350, 359-362, 397, 414-415, 421, 447, 450
 théories des cordes : 236, 291-293, 304, 307, 309-310, 320, 325, 333, 335, 337-338, 341, 349-352, 358-360, 362, 367, 369-370, 372, 375-376, 378, 381, 383-387, 389, 391, 418, 420, 423, 430, 442, 450
 thermodynamique : 365
 désastre : 186
 'T Hooft, Gerard : 15, 22-23, 26, 28, 182, 184-185, 189, 192, 194, 196, 199, 210, 212, 222, 225, 248, 251-253, 260-261, 271, 282, 290-291, 294, 297, 303-304, 308-309, 350-351, 362, 365-369, 443, 445
 Thorlacius, L  rus : 233-234, 263, 293
 Thorne, Kip : 144
 tombe de Grant, analogie de la : 135-136, 298
 Tomonaga, Sin-Itiro : 13
 trajectoire : 11, 42-44, 58, 60-61, 64, 66, 68, 105, 243, 256, 313, 345, 449
 triangle sphérique : 56
 trou de ver : 73-74
 trou noir : 14-16, 22-23, 25-27, 29, 34-36, 40, 42, 48-49, 72-73, 75-77, 93, 116, 118, 120-121, 124-126, 143-144, 148-156, 161-162, 164-166, 168-175, 179, 183-186, 189-191, 193-194, 196-197, 199-201, 209, 213, 215, 217, 219, 221-222, 226-227, 234-235, 237-239, 241, 249, 251-256, 258-261, 263, 267-268, 270-271, 282, 286-290, 293, 300, 302, 304, 307, 338, 350-353, 355-357, 360, 365, 367-369, 371,

373-375, 378-381, 383-384, 387-388, 390, 394-395, 397, 402-403, 414-416, 419, 424-427, 429-430, 432, 434, 438, 442, 448, 450, 463
CGHS : 234-236, 249, 289, 338, 388, 415

U-V

Uglum, John : 233
ultraviolet (UV) : 207-208, 247, 268, 353, 421-424, 450-451
Une brève histoire du temps (Hawking) : 150
unitarité : 93
unités de Planck : 141, 155-156, 173, 302, 384, 417, 430, 449-450
Unruh, Bill : 45-46, 185, 238, 356

Vafa, Cumrun : 379-381, 384, 387-388, 390, 438
variété de Calabi-Yau : 341-343
vertex : 106-107, 323-324, 327, 331, 412
Virasoro, Miguel : 392
viscosité : 426-427, 451
 de cisaillement : 426
vitesse : 10-12, 25, 30-34, 41-42, 45-52, 61, 63-65, 67-69, 76, 81-82, 84, 86-87, 94, 96-99, 108, 113-115, 117, 128, 148, 153, 161, 183, 190-191, 193-195, 204-206, 221-222, 228, 242-244, 247-248, 292, 312, 319-320, 326, 339, 356-361, 366, 389-390, 407, 418, 429, 431-432, 449-451
vitesse de libération : 30-34, 51-52, 451

voxels : 294-295, 333

W-Y-Z

Wadia, Spenta : 390
Warped Passages, « Chemins tordus » (Randall) : 310, 421
Watson, James D. : 253, 277, 310
Weinberg, Steven : 13, 145, 216, 223, 337
What We Believe but Cannot Prove, « Ce que nous croyons sans pouvoir le prouver » (Brockman) : 110
Wheeler, John Archibald : 13, 31, 69, 72-73, 120, 138-139, 144-148, 150, 168, 210, 212, 238, 376, 443, 463
White, T. H. : 123, 147, 296
Wilberforce, évêque Samuel « Sam la Savonnette » : 277
Wilberforce, révérend William : 283
Wilczek, Franck : 22
Witten, Edward : 268, 378-379, 414-415, 421
Wolfson, Isaac : 276
Woody et les robots (film de Woody Allen) : 75

Yau, Shing-Tung : 271, 341
Yeshiva University's Belfer Graduate School of Sciences : 119, 158, 166
Young, Brigham : 280-281

Zanelli, Jorge : 394, 396-397, 402
Zeldovitch, Yakov B. : 159
zéro absolu : 98-99, 129, 134, 142, 162-163, 165, 169, 171-172, 174, 200-201, 206, 330, 389, 448

Table

<i>Introduction</i>	9
---------------------------	---

Première partie : L'orage menace

1. — Première salve	21
2. — L'étoile noire	29
3. — Une autre géométrie que celle de grand-papa	53
4. — « Einstein, ne dis pas à Dieu ce qu'il doit faire ! ».....	79
5. — Les nouvelles unités de mesure de Planck	113
6. — Dans un bar de Broadway	119
7. — Énergie et entropie	128
8. — La bande de Wheeler, ou quelle quantité d'information peut-on fourrer dans un trou noir ?	144
9. — Lumière noire	158

Deuxième partie : Attaque surprise

10. — Stephen a perdu ses bits, ne sait où ils habitent.....	179
11. — Résistance hollandaise.....	193
12. — À quoi bon ?	200
13. — Pat	211
14. — Escarmouche à Aspen	224

Troisième partie : Contre-attaque

15. — La bataille de Santa Barbara	233
16. — Marche arrière, toute !	264
17. — Achab à Cambridge	270
18. — L'univers est un hologramme	289

Quatrième partie : L'étreinte se referme

19. — Arme de déduction massive	307
20. — L'Avion d'Alice ou la dernière hélice visible	352
21. — Compter les trous noirs	364
22. — L'Amérique du Sud gagne la guerre	392
23. — De la physique nucléaire, ça ? Vous voulez rire !	417
24. — Humilité	428
<i>Épilogue</i>	437
<i>Remerciements</i>	445
<i>Glossaire</i>	447
<i>Index</i>	455